ANEXO 2

APLYSIA
SOLUÇÕES AMBIENTAIS

FUNDAÇÃO RENOVA

RELATÓRIO TÉCNICO

RENATURALIZAÇÃO DO RIO GUALAXO DO NORTE

Modelagem Hidráulica dos trechos RGN-A, RGN-B, RGN-C, RGN-D, TG-11, TG-16 e TG-29

Relatório Técnico n° 003/2024

Revisão 03



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 3

2. OBJETIVOS 5

2.1 OBJETIVO GERAL DO PROJETO 5

2.2 OBJETIVO GERAL DO RELATÓRIO 5

3. ÁREA DE ESTUDO 5

4. DOCUMENTOS E DADOS UTILIZADOS 11

5. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO E PLANIALTIMÉTRICO 11

6. HIDROLOGIA 23

7. MODELAGEM HIDRÁULICA 27

7.1 DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA 27

7.2 CENÁRIOS DE MODELAGEM 29

7.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO 45

7.4 OBTENÇÃO DE RESULTADOS - ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE VELOCIDADES NAS ESTRUTURAS 46

8. LIMITAÇÕES E INCERTEZAS 90

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS 91

10. DADOS DA CONTRATANTE E CONTRATADA 92

10.1 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE 92

10. 2 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATADA 92

11. EQUIPE TÉCNICA 93

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

1. INTRODUÇÃO

Em consequência das alterações decorrentes da passagem da lama nos ecossistemas atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, foram aplicadas medidas mitigadoras pela Fundação Renova, como a renaturalização de trechos do rio Gualaxo do Norte. A renaturalização é um método de restauração de rios que visa recuperar as condições naturais do ecossistema impactado, através da inserção de material lenhoso e outras intervenções que visam promover a criação de habitats e favorecer o reestabelecimento da biota aquática. O Projeto Piloto de Renaturalização engloba as ações compreendidas pelo Programa de Manejo de Rejeitos, que considera o atendimento ao Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) assinado em 02/03/2016. E como documento norteador destas ações de manejo da Fundação Renova, cita-se o Plano de Manejo de Rejeito – Revisão 01 (JACOBS; CH2M, 2017), aprovado pela Deliberação do Comitê Interfederativo (CIF) nº 86/2017. Ressalta-se ainda que em agosto de 2017, tal projeto foi apresentado ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

A partir deste pressuposto foi implementado, em julho de 2018, nos Trechos T6 e T7 o Projeto Piloto de Renaturalização – PPR dos cursos d'água atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, que teve como objetivo principal acelerar o restabelecimento das condições ambientais do rio Gualaxo do Norte - RGN através do aumento da retenção de sedimento, controle da erosão, melhoria da heterogeneidade do fundo e, consequentemente, aumento da abundância e biodiversidade de bentos e ictiofauna.

A restauração fluvial realizada através da introdução de troncos de madeira no leito do rio, gera benefícios ecossistêmicos reconhecidos como observado em trabalhos descritos por Gippel (1995); Culp et al. (1996); Benke e Wallace (2003); Correll (2005); Bennett e Gilchrist (2010) e Extence et al. (2013).

A partir da decisão judicial emitida até então pelo juízo da 12ª Vara Federal Cível e Agrária de MG, no âmbito dos itens 5 e 5.1 do Eixo Prioritário 1 da Ação Civil Pública nº 69758-61.2015.4.01.3400, foi determinada a expansão do projeto de Renaturalização do rio Gualaxo do Norte e seus tributários. Atualmente o processo é tratado pela 4ª Vara Federal Cível e Agrária de Belo Horizonte. Em julho de 2021, foi implementado no Trecho 09 mais 2 km de projeto no Rio Gualaxo do Norte. Após avaliação e obtenção de resultados positivos (FURLEY et. al. 2022) referente ao projeto ReNaturalize, a Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) através da NT 19/2022, requisitou a elaboração de um

projeto executivo para uma nova expansão do projeto. Para tanto, a Fundação Renova elaborou o estudo "Avaliação inicial de áreas prioritárias a receberem intervenções para recuperação de habitats – Revisão 06" (NHC, 2022), a fim de selecionar áreas passíveis para aplicação do projeto no que tange a diversidade de habitats.

Como parte dos processos para desenvolvimento do projeto de renaturalização é necessária a realização de uma avaliação da influência da implementação das técnicas de renaturalização na dinâmica hidráulica do rio, referente aos padrões de velocidade do fluxo de água. Desta forma, estabeleceu-se como requisito a execução de simulações hidráulicas das condições de escoamento do rio para os cenários com e sem estruturas de renaturalização instaladas (NHC, 2020a; WALM, 2019a).

Portanto, dando continuidade ao Projeto de Expansão de Renaturalização - PER do rio Gualaxo do Norte (RGN), tem-se a expectativa de realizar a implantação das técnicas de renaturalização em mais sete trechos, entre a calha principal do RGN e alguns dos seus tributários, seguindo a sequência de montante para jusante. Para tanto, foram realizadas atividades de modelagem hidráulica nos seguintes trechos: TG-11 (córrego tributário Capitão), RGN-D (rio Gualaxo do Norte), RGN-C (rio Gualaxo do Norte), TG-16 (córrego tributário Maravilha), RGN-B (rio Gualaxo do Norte), RGN-A (rio Gualaxo do Norte), e TG-29. Essas atividades, de caráter preliminar, foram conduzidas considerando os locais predefinidos para a alocação das estruturas de renaturalização.

Este relatório, por sua vez, apresenta os estudos de modelagem hidráulica nos trechos mencionados, obtendo resultados preliminares relacionados ao entorno das estruturas, no que diz respeito a padrões de velocidade a montante e jusante, a fim de avaliar impactos no leito do rio.

Ressalta-se que os estudos anteriores de modelagem hidráulica, tanto do PPR (trechos 6 e 7) (NHC, 2020a), quanto no PER (Trecho 9) (APLYSIA, 2020c), indicam que as estruturas não afetam significativamente o comportamento hidráulico geral do rio, indicando baixo risco de erosão ao longo das margens. A potencial falha individual, descrita por diferentes forças no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024b), das estruturas não representa um risco iminente de avulsão ou de erosão progressiva, que poderia resultar em uma liberação de rejeitos. No entanto, esses possíveis impactos também poderiam acontecer da mesma forma se não houvesse a instalação das estruturas. Especificamente para os estudos do PER (APLYSIA, 2020c), os resultados das velocidades indicaram aumento nas extremidades das estruturas,

podendo chegar a 0,3 m/s (TR = 2 anos), e em regiões afastadas das estruturas devido ao tamanho da malha de modelagem. As estruturas nas margens diminuem as velocidades ao seu redor, sugerindo uma mitigação de processos erosivos nas margens, enquanto as velocidades aumentam ligeiramente no centro da calha do rio e à jusante da estrutura, fora do alcance da "pluma" de interferência da estrutura, reforçando a necessidade de avaliação individual das estruturas na modelagem.

Vale ressaltar que o presente relatório é concomitante ao Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024b), sendo fundamental para complementar e enriquecer as conclusões discutidas nesse relatório, fornecendo uma visão mais abrangente e aprofundada das questões abordadas sobre a estabilidade das estruturas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL DO PROJETO

O objetivo geral do projeto é acelerar o restabelecimento das condições ambientais do rio Gualaxo do Norte por meio da implementação da técnica de renaturalização.

2.2 OBJETIVO GERAL DO RELATÓRIO

O objetivo geral deste relatório é apresentar os resultados das simulações da influência das estruturas de madeira alocadas nas suas posições preliminares nos padrões de velocidade naturais dos trechos de rios analisados.

3. ÁREA DE ESTUDO

O Projeto de Renaturalização está sendo implementado no rio Gualaxo do Norte e em seus tributários, que pertencem à bacia hidrográfica do rio Doce. Sua cabeceira se encontra na serra do Espinhaço a nordeste do município de Ouro Preto e a noroeste do município de Mariana-MG. Esse rio segue na direção leste com sua confluência com o rio do Carmo, nas proximidades do município de Barra Longa-MG. A área de estudo foi pré-selecionada de acordo com a avaliação realizada pela NHC e apresentada através do Memorando Técnico 2 (NHC, 2023). Os trechos pré-selecionados consistem em quatro trechos no rio Gualaxo do

Norte (RGN-A, RGN-B, RGN-C e RGN-D) e três tributários (TG-11, TG-16 e T29), localizados nos trechos de T8 e T9 do Plano de Manejo de Rejeitos (JACOBS; CH2M, 2017)

A localização do início e final de cada trecho, assim como a representação esquemática estão apresentados na Tabela 1 e Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 - Localização do início e final de cada trecho no rio Gualaxo do Norte-MG (Datum SIRGAS 2000 UTM Zona 23).

Trecho	Início		Final		Extensão Proposta (m)	Extensão Validada (m)	Declividade / Energia Final (m/m)
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude			
RGN-A	7754930	688577	7755618	688511	730	430	0,001
RGN-B	7759792	674743	7759352	674467	790	790	0,0025
RGN-C	7761126	673106	7761152	673858	850	850	0,0029
RGN-D	7759245	670778	7759130	671237	750	750	0,0022
TG-11	7759558	669433	7759821	669728	470	470	0,082
TG-16	7760357	674707	7760238	674668	150	150	0,0027
TG-29	7753643	682692	7753893	682897	370	370	0,0014

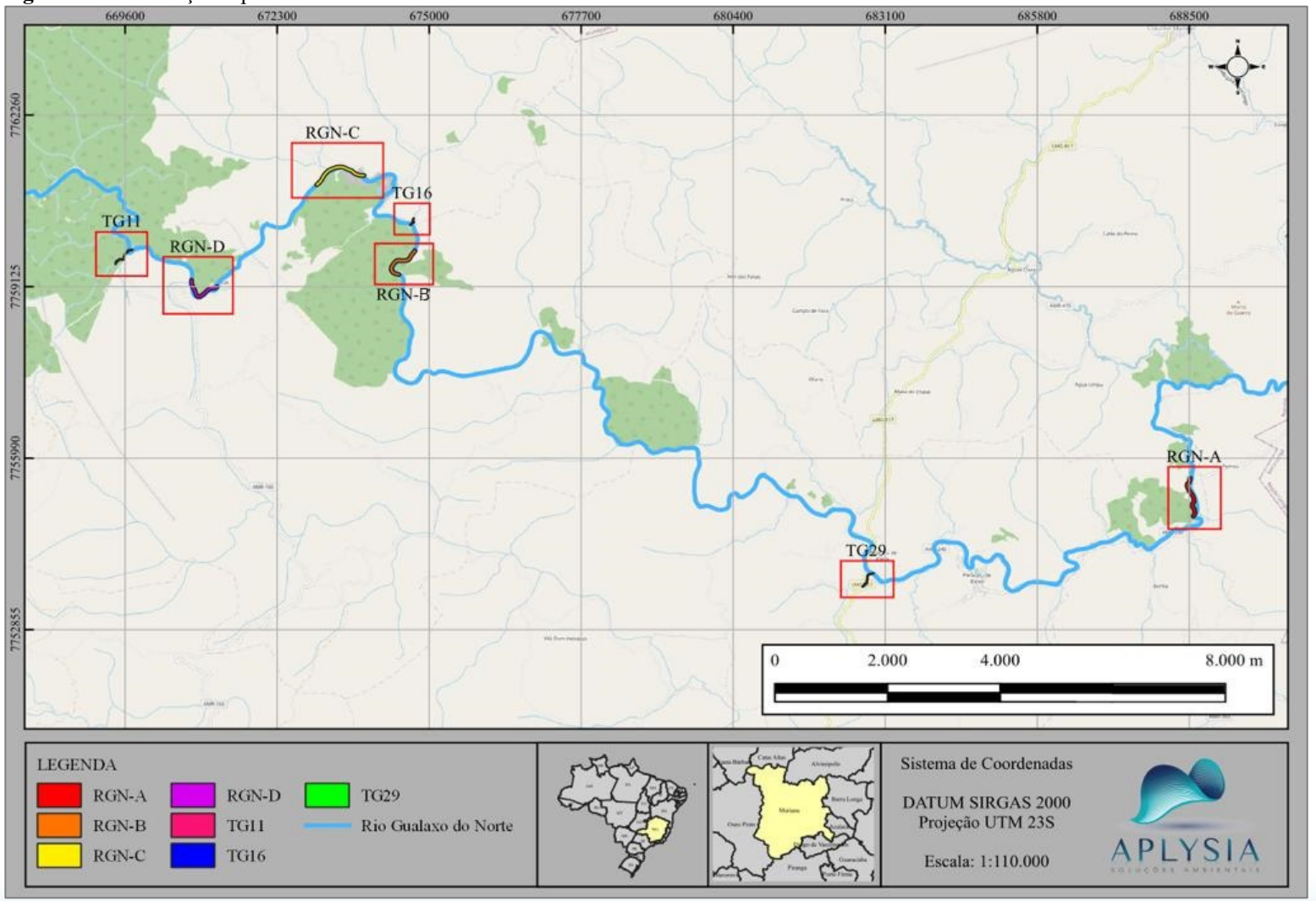
As declividades encontradas variam de 0,001 m/m (RGN-A, mais suave) a 0,082 m/m (TG-11, mais acentuada) na porção final dos trechos, em jusante, indicando a grande variabilidade de condições de energia disponível aos escoamentos estudados nos diferentes trechos.

Ressalta-se que a fase de validação das extensões a serem renaturalizadas é realizada em duas etapas de análises de viabilidade de implementação do projeto. A primeira etapa foi através do estudo intitulado "Avaliação Inicial de Áreas Prioritárias para Intervenções na Recuperação de Habitats" (NHC, 2022a). Este estudo teve como objetivo selecionar áreas passíveis para a execução de iniciativas de renaturalização. Para isso foram consideradas a presença de habitats físicos no ano de 2021, utilizando critérios que incluíram a escolha de segmentos com diversidade de habitats físicos inferior à média de referência (NHC, 2022b). Posteriormente, foram realizadas atividade de avaliação e validação os trechos pré-

selecionados, além de formular preliminarmente o design de instalação e aplicar o protocolo de avaliação de habitats. Do total planejado de 4,1 km para a renaturalização do rio Gualaxo do Norte e seus tributários, aproximadamente 540 m foram identificados como inicialmente inviáveis para a aplicação das técnicas de renaturalização (APLYSIA, 2023). Portanto, considera-se favoráveis para o processo cerca de 3,57 km de renaturalização. As circunstâncias que tornam inviável a aplicação das técnicas de renaturalização nos trechos identificados estão associadas a diferentes áreas. Os detalhes referentes a etapa de validação são apresentados no relatório de campo desses estudos (APLYSIA, 2023). As extensões propostas e validadas para cada trecho são apresentadas na Tabela 1.

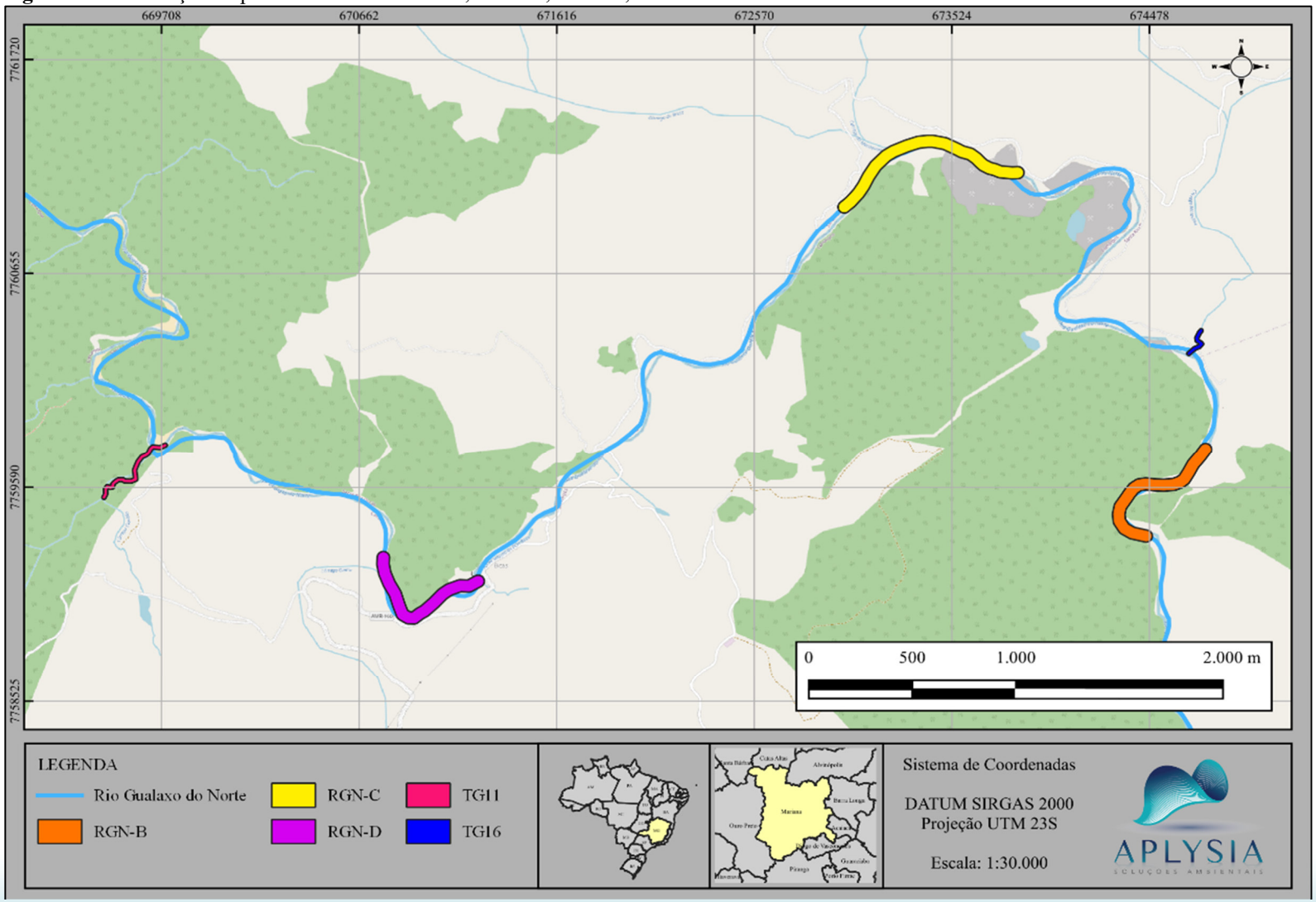
A segunda etapa de validação é determinada após a avaliação dos resultados da modelagem hidráulica apresentados neste relatório.

Figura 1 – Localização espacial dos trechos de estudo no rio Gualaxo do Norte-MG e seus tributários.



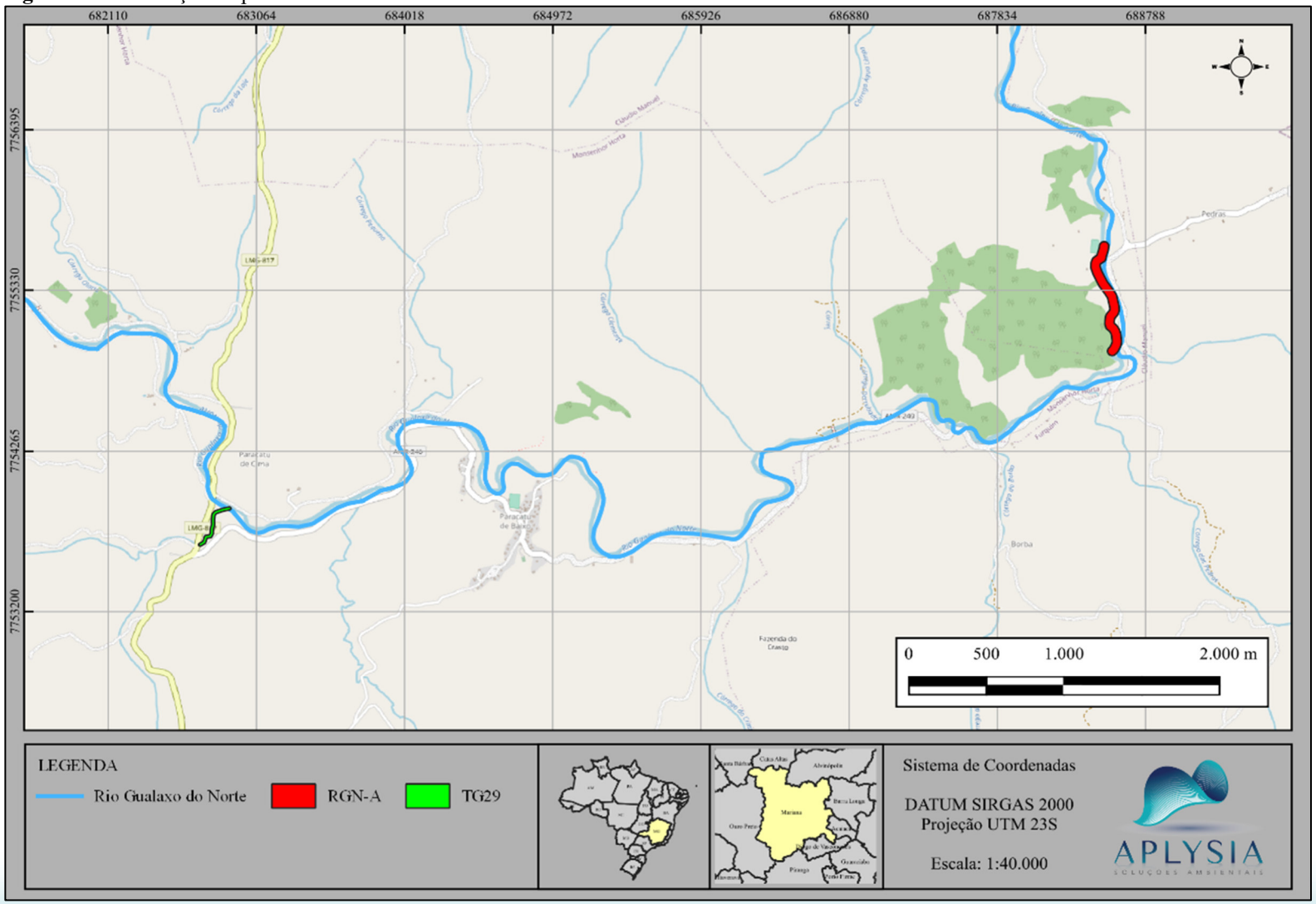
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 2 - Localização ampliada dos trechos TG-11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 3 - Localização ampliada dos trechos TG-29 e RGN-A.



Fonte: Aplysia, 2024.

A princípio foram previstos para os trechos selecionados um total de aproximadamente 4,1 km de extensão a serem aplicadas as técnicas de renaturalização. No entanto, após realização das etapas de validação em campo, foram considerados viáveis para a implementação cerca de 3,57 km. Entre os dias 25 e 30 de outubro de 2023, as velocidades medidas do rio Gualaxo do Norte estavam em torno de 0,8 a 1,3 m/s em diferentes locais (RGN-A, RGN-B, RGN-C e RGN-D) assim como de 0,95 a 1,4 m/s para os seus tributários (TG-11, TG-16 e TG-29). As medições foram realizadas por meio do método do flutuador.

4. DOCUMENTOS E DADOS UTILIZADOS

A fim de subsidiar a construção deste relatório foram utilizados dados levantados em campo (topografia, batimetria e imageamento aéreo), assim como documentos anteriores ou que complementam os dados necessários à sua elaboração. A seguir são listados os documentos e dados utilizados:

- Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte - Relatório Técnico – Civil (Drenagem) (WALM, 2019a);
- Regionalização de Vazões da Bacia dos Rios Gualaxo do Norte e do Carmo (WALM, 2019b);
- Avaliação do Projeto Piloto de Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte (NHC, 2020a);
- Peer Review do Estudo Hidrológico de Regionalização de Vazão Para o Projeto Piloto de Renaturalização (Trecho 6 e Trecho 7) e da Estação de Tratamento Natural (ETN) (NHC, 2020b);
- Definição do Trecho Para Expansão do Projeto ReNaturalize (APLYSIA, 2020a);
- 8ª Avaliação da Manutenção das Instalações das Estruturas de Madeira (APLYSIA, 2020b);
- Modelagem Hidráulica do Trecho do Projeto de Expansão de Renaturalização (APLYSIA, 2020c);
- Estabilidade das Estruturas do Projeto de Expansão de Renaturalização (APLYSIA, 2020d);

5. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO E PLANIALTIMÉTRICO

Os levantamentos topobatimétricos dos trechos RGN-B, RGN-C e RGN-D, bem como dos córregos tributários TG-11 e TG-16, foram realizados nos dias 25, 26, 27, 28 e 30 de outubro de 2023. Já o trecho RGN-A e o córrego tributário TG-29 foram levantados em 13 de novembro de 2023.

O levantamento planialtimétrico foi obtido por meio de Reconstrução Digital Tridimensional do terreno adjacente às margens do rio em estudo (porções emersas), gerada a partir de imagens aéreas capturadas em levantamento aerofotogramétrico por drone, associada à obtenção de seções batimétricas das porções submersas, sendo gerado levantamento com GSD (*Ground Sample Distance* ou distância da amostragem do solo), real inferior a 3 cm, correspondendo ao tamanho de cada pixel representado nas imagens capturadas durante o levantamento fotogramétrico do terreno.

Para a Reconstrução Digital Tridimensional, foram utilizadas imagens aéreas com resolução de cerca de 20MP, com cobertura lateral e longitudinal de pelo menos 80% em altitudes de 20m, 50m e 80m, resultando em um levantamento com uma resolução real inferior a 3cm. A reconstrução tridimensional foi realizada por meio de processamento, os quais geraram uma nuvem de pontos a partir das imagens aéreas sequenciais de cada trecho, semelhante ao processo de escaneamento a laser, resultando em um Modelo Digital de Terreno (MDT) das áreas emersas próximas ao rio.

A região ocupada pela superfície da água entre as margens foi excluída desses modelos, sendo substituída posteriormente pelo MDT específico das porções submersas. Para ajustar a posição e as dimensões dos modelos, foram utilizados pontos centrais foto-identificáveis de marcos posicionais distribuídos ao longo das áreas levantadas, com o auxílio do Receptor GNSS L1/L2 Geomax Zenith 16/40 Series, cujos resultados foram compatíveis com a Classe A para levantamentos topográficos, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 13133 (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo de marcos posicionais distribuídos ao longo das áreas a serem levantadas.



Fonte: NeoVision, 2024.

Os levantamentos tiveram como base o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro), Datum Horizontal SIRGAS2000 UTM 23S (EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM zone 23S).

Foram implantados, em cada trecho levantado, marcos de apoio básico, utilizando-se equipamento Receptor GNSS-RTK (*Global Navigation Satellite System - Real Time Kinematic*), tipo geodésico de dupla frequência (L1/L2), com tempo de rastreio de aproximadamente 3 (três) horas. Coordenadas e cotas de cada base foram posteriormente corrigidas pelo método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Figura 5 e 6).

Para as seções batimétricas das porções submersas, foram obtidos pontos sequenciais por GNSS-RTK a cada 1m de margem a margem, com transectos aproximadamente a cada 20m ao longo do rio, estabelecendo nas seções transversais perfis de profundidade representativos do leito de toda a área em estudo (Figura 7).

Figura 5 - Exemplo de marcos posicionais distribuídos ao longo das áreas a serem levantadas.



Fonte: NeoVision, 2024.

Figura 6 - Exemplo de marcos posicionais distribuídos ao longo das áreas a serem levantadas.



Fonte: NeoVision, 2024.

A partir dos pontos das seções transversais, foi criada uma malha tridimensional utilizando o método TIN (*Triangulated Irregular Network*), resultando em um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a porção submersa dos trechos levantados. Posteriormente, os MDTs das áreas emersas e submersas foram combinados, resultando em modelos tridimensionais unificados da calha do rio e suas adjacências.

Para auxiliar na modelagem hidráulica, foi gerado o MDT da parte emersa que compreende o trecho desde o início do córrego TG-11 até o final do trecho RGN-B do projeto, proporcionando um levantamento integrado de todo o percurso do rio que inclui os trechos RGN-B, RGN-C e RGN-D, além dos córregos tributários TG-11 e TG-16. Ainda, foram gerados os MDT's dos trechos mais distantes de forma individual, sendo o TG-29 e o RGN-A.

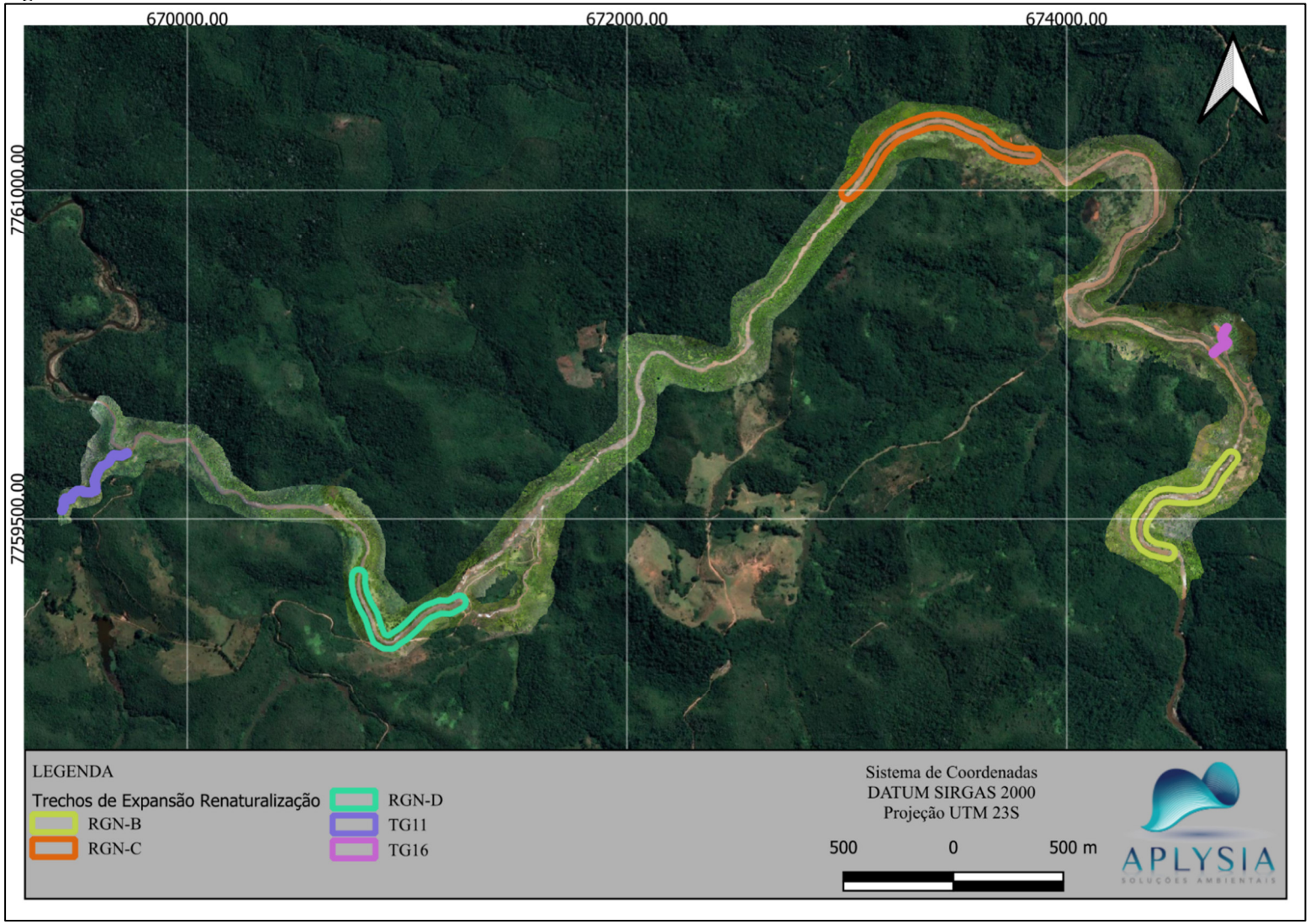
Por fim, foram realizadas filmagens aéreas de alta resolução e fotografias aéreas oblíquas georreferenciadas, obtidas em baixa altitude em todos os trechos em estudo. As Figuras 8 a 13 apresentam as Ortofotos e os respectivos Modelos Digitais de Terreno (MDT) elaborados a partir do levantamento planialtimétrico e batimétrico.

Figura 7 - Representação de pontos das seções batimétricas transversais de margem a margem do rio.



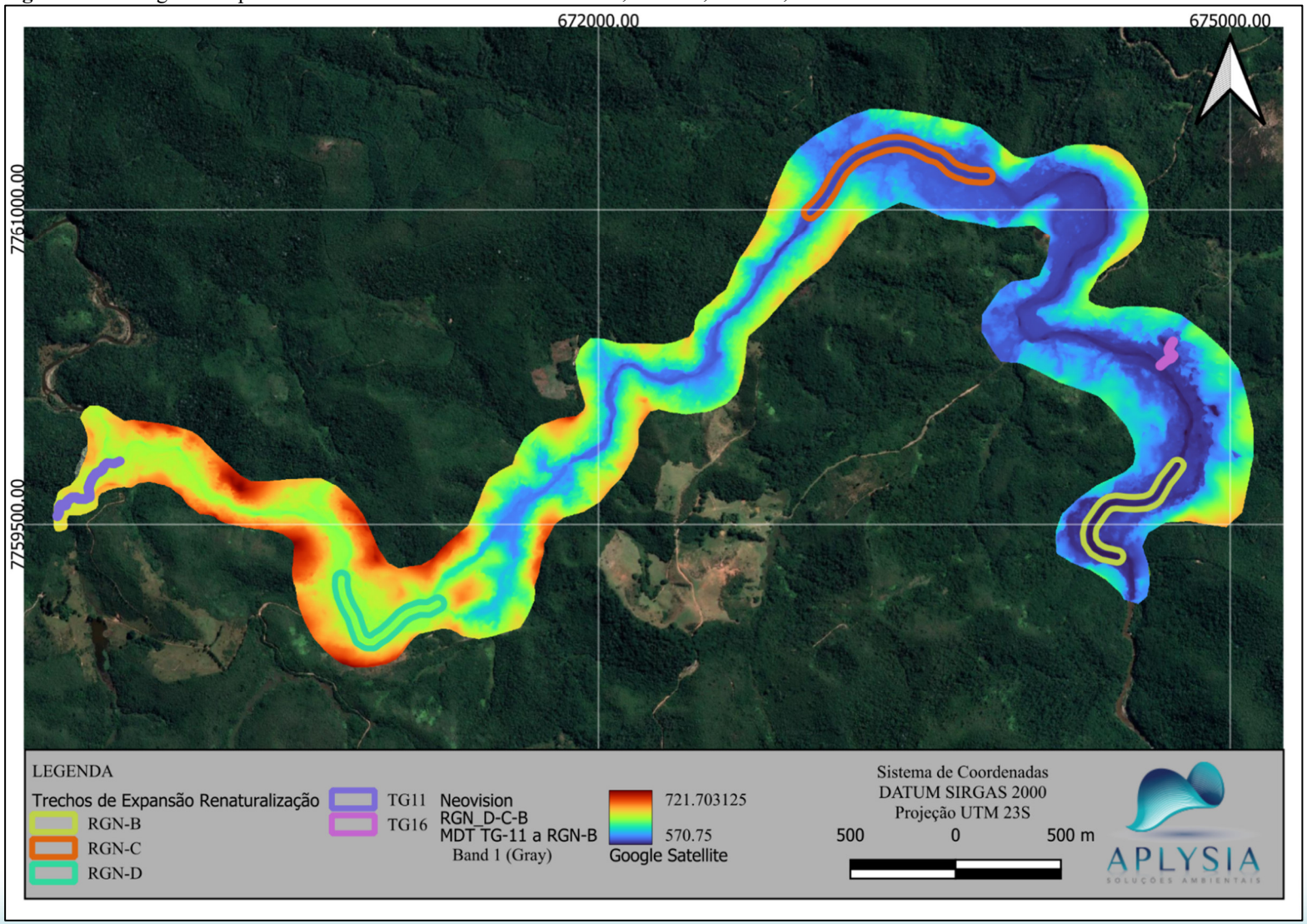
Fonte: NeoVision, 2024.

Figura 8 - Ortofoto aérea: TG11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 9 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: TG11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.



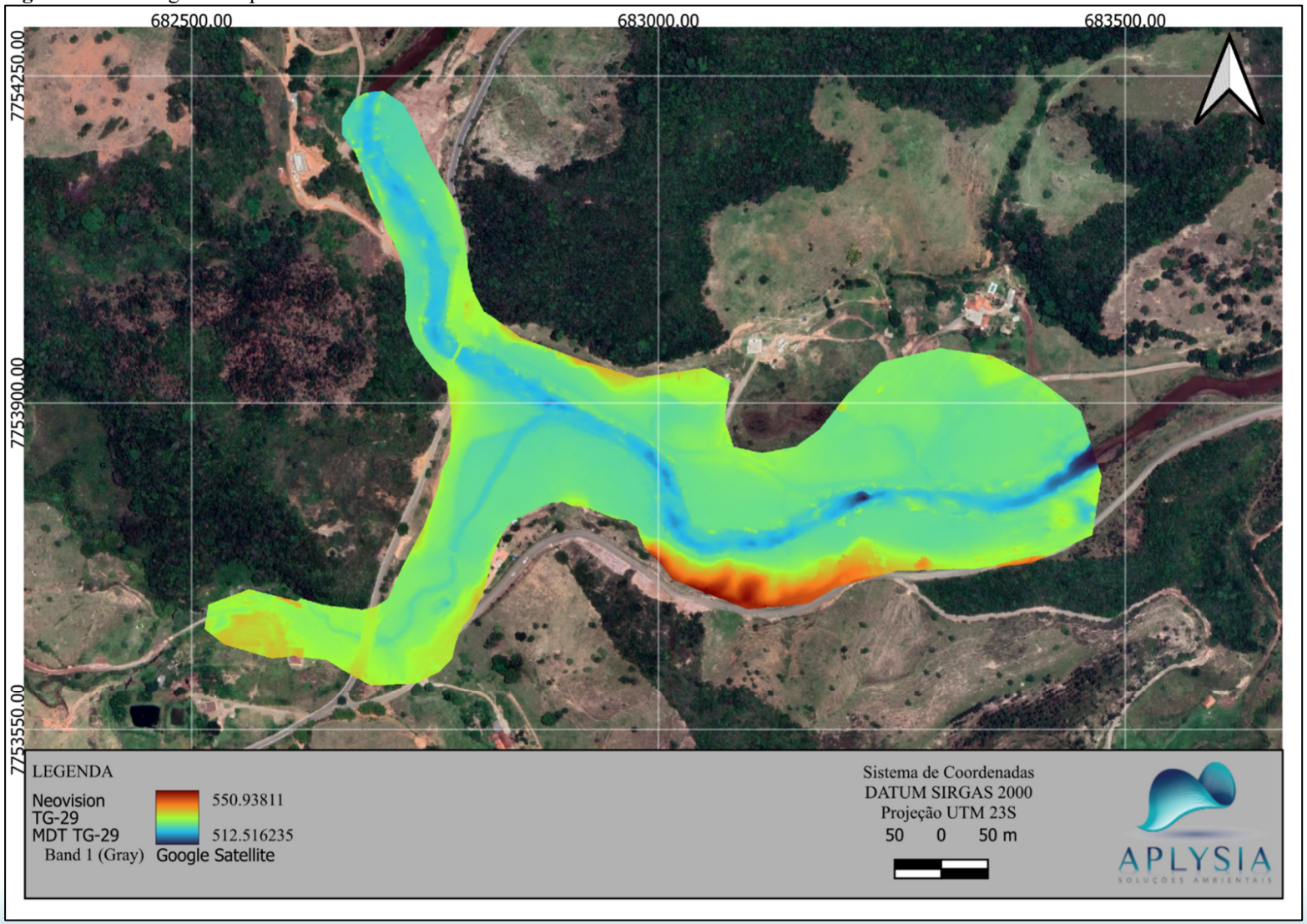
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 10 - Ortofoto aérea: TG-29.



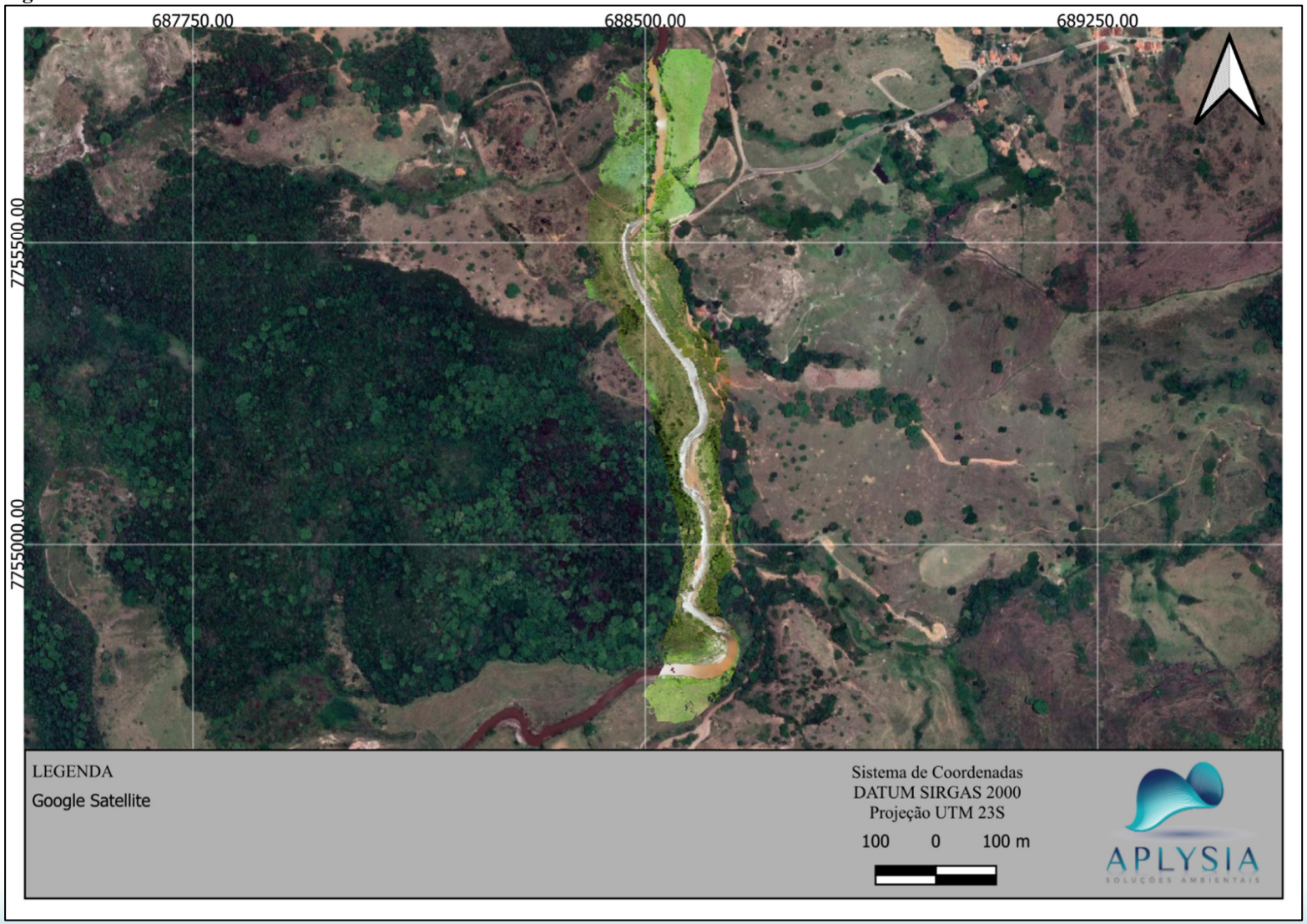
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 11 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: TG-29.



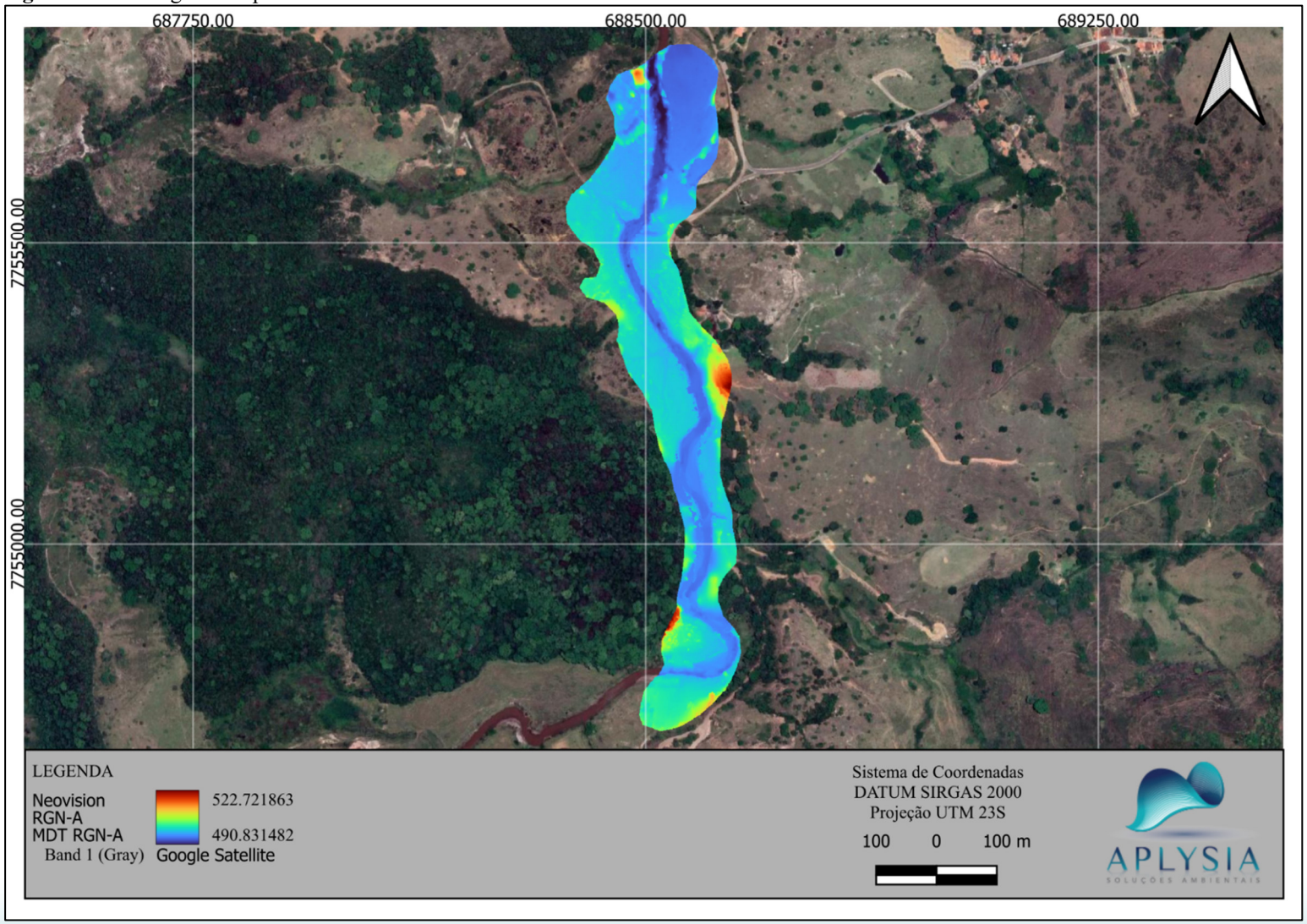
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 12 - Ortofoto aérea: RGN-A.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 13 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: RGN-A.



Fonte: Aplysia, 2024.

6. HIDROLOGIA

As cheias nos trechos de interesse do RGN foram objeto de estudo de alguns trabalhos realizados durante o desenvolvimento do Projeto Piloto de Renaturalização (PPR), assim como documentos independentes elaborados por diferentes empresas (WALM, 2019a; NHC, 2020a; NHC, 2020b), sendo que o presente capítulo os adota como diretriz, tratando-se de documentos robustos na temática de regionalização de vazões, não se tratando de item a ser detalhado significativamente no presente documento.

O estudo de regionalização desenvolvido nas referências supracitadas utilizou, dentre algumas alternativas, o método *Index Flood*. As vazões foram adimensionalizadas e posteriormente ajustadas para uma distribuição probabilística (GEV - distribuição generalizada de valores extremos). A partir da curva de frequência regional adimensionalizada e dos parâmetros médios dos postos selecionados foi possível construir as equações referentes aos respectivos tempos de retorno (TR).

A abordagem adotada no estudo hidrológico demandou à NHC apresentar (NHC, 2020b) uma análise independente dos estudos hidrológicos elaborados por WALM (2019b) comparando-os a outras metodologias e seus respectivos resultados. Nesse contexto, foram avaliadas pela NHC a utilização de regionalização por meio de *index-flood*, transferências proporcionais das cheias estimadas nas estações RGN instaladas pela Renova, transferências a partir de dados da estação PCH Bicas Jusante e da estação Fazenda Ocidente e o emprego dos resultados obtidos no Atlas das Águas de Minas (HIDROTEC, 2010).

Assim, basicamente o estudo consistiu em realizar análises com diferentes métodos e conjuntos de postos fluviométricos, e assim definir faixas de valores de vazão, sendo apresentado, no presente estudo, os valores mínimo e máximo dos respectivos TR's por meio das diferentes abordagens (NHC, 2020b).Vale destacar que o estudo esclarece que o mesmo foi desenvolvido com base em análise estatística e possui incertezas devido ao método utilizado aplicado aos dados. Entretanto, pode-se ressaltar que o uso das equações obtidas para cálculos de vazões são para áreas de drenagem menores que as áreas das estações fluviométricas utilizadas (abaixo de 529 km², área do posto fluviométrico de maior confiabilidade – Fazenda Ocidente), tornando propícia a utilização para o presente estudo e reduzindo erros e incertezas.

Como referência, foram apresentados, um comparativo entre as vazões de cheia para diversos tempos de recorrência (TR) resultantes da aplicação da metodologia considerada (2,

25 e 50 anos) para cada um dos trechos 6, 7 e 8, apresentados na Tabela 2. Ainda foi adicionado o trecho 9 (PER) adotado em Aplysia (2020c). A área de drenagem correspondente aos trechos, equivale sempre ao ponto mais a montante do trecho avaliado.

Tabela 2 - Vazões máximas necessárias para as simulações hidráulicas.

Trechos	Área de Drenagem Correlata (Km^2)	TR (anos)	Vazão mínima da faixa (m^3/s)	Vazão máxima da faixa (m^3/s)
Trecho 6	105,10	2	14,3	**36,0**
		25	31,9	**82,5**
		50	36,8	**111,1**
Trecho 7	169,78	2	22,7	**48,6**
		25	50,7	**110,4**
		50	58,5	**142,6**
Trecho 8	195,36	2	26,0	**53,1**
		25	58,2	**120,7**
		50	67,1	**154,6**
Trecho 9 (PER)	240,66	2	32,0	**65,4**
		25	71,7	**148,7**
		50	82,7	**190,4**

Todos os documentos supracitados destacaram que há uma grande dificuldade na estimativa das cheias de projeto para a região, já que há uma diferença considerável entre as áreas de drenagem dos trechos em estudo e dos pontos de monitoramento e estações oficiais da rede fluviométrica.

Em função dessa diferença, fez-se necessária a extrapolação do comportamento hidrológico observado nas estações para a região dos trechos de interesse do RGN. A metodologia utilizada para estimativa dessas vazões levou em consideração a proximidade da maioria dos presentes trechos em análise (RGN-A, RGN-B, RGN-C, RGN-D, TG-11, TG-16 e T29) com o local de implantação da ETN (Trecho 8) e, por esse motivo, foi o selecionado para as extrapolações, com base na similaridade hidrológica em termos de área de drenagem e localização do ponto de exutório.

As limitações identificadas, além da questão das áreas de drenagem mencionadas, conforme NHC, 2020b, consistem em:

- Período mínimo considerado satisfatório para uma análise estatística de frequência para determinação das vazões de cheia nos estudos supracitados;
- Uso e ocupação do solo nas estações fluviométricas utilizadas são ligeiramente superiores aos das áreas de drenagem dos locais de interesse;
- Apesar de se localizarem dentro de uma mesma isoieta de precipitação, não foi avaliado em detalhe as condições climáticas e características das precipitações entre as estações utilizadas (compreendidas na bacia do Rio Doce) e o rio Gualaxo do Norte;
- Estudo Hidrológico atualizado para todos os trechos de interesse levando em consideração as estações fluviométricas, localizadas no RGN e instaladas pela Fundação RENOVA, quando estes tiverem registro mínimo adequado, a partir de 10-20 anos de dados;
- Abordagem de estudo hidrológico direcionado para os tributários, em caso de monitoramento de suas pequenas bacias, permitindo extrapolação de vazões atribuídas mais coerentes com a realidade deles;
- Análise de Sensibilidade em relação as vazões utilizadas, sendo que todos os estudos supracitados não recomendam a sua utilização sem o expresso reconhecimento de suas limitações e incertezas, pois pode induzir a uma falsa impressão de segurança quanto às vazões selecionadas para as análises nos estudos hidráulicos e/ou dimensionamento de intervenções na área de estudo.

Nesse contexto, a determinação das vazões de cheia para os novos trechos estudados nas simulações hidráulicas levou em consideração as áreas de drenagem dispostas na Tabela 3, estabelecendo uma razão de proporção com as análises desenvolvidas em NHC (2020b), sendo que a aplicação de uma correlação direta das vazões de cheia é indicada pela literatura especializada (ELETROBRAS, 2000). O ordenamento a seguir considera o sentido de montante a jusante, para cada um dos trechos, a partir da nascente até a foz do RGN. A área de drenagem correspondente aos trechos, assim como a tabela anterior, também equivale sempre ao ponto mais a montante do trecho avaliado (início do mesmo).

Tabela 3 - Vazões máximas necessárias para as simulações hidráulicas.

Trechos PER (Montante a Jusante)	Área de Drenagem Correlata (Km²)	TR (anos)	Vazão mínima da faixa (m³/s)	Vazão máxima da faixa (m³/s)
TG11	4,71	2	0,63	**1,58**
		25	1,40	**3,59**
		50	1,62	**4,59**
RGN a montante TG11, RGN-D e RGN-C	186,51	2	24,82	**62,44**
		25	55,56	**141,96**
RGN a montante TG11, RGN-D e RGN-C	186,51	50	64,06	**181,77**
RGN a montante TG16 e RGN-B	220,52	2	29,35	**73,82**
		25	65,70	**167,85**
		50	75,74	**214,92**
TG16	11,26	2	1,50	**3,77**
		25	3,35	**8,57**
		50	3,87	**10,97**
RGN a montante do TG29	280,09	2	37,28	**93,76**
		25	83,44	**213,19**
		50	96,20	**272,98**
TG29	4,47	2	0,59	**1,50**
		25	1,33	**3,40**
		50	1,53	**4,35**
Montante RGN-A	314,27	2	41,83	**105,21**
		25	93,62	**239,21**
		50	107,94	**306,29**

As áreas de drenagem utilizadas foram extraídas por geoprocessamento, tendo como base banco de dados do IDE-SISEMA (Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), de Minas Gerais.

Por fim, conforme NHC (2020b), dentre os procedimentos de cálculo avaliados, os resultados mais conservadores, para fins de dimensionamento de estruturas e estudo hidrodinâmico, podem ser obtidos pela análise dos valores máximos da faixa referente a cada TR, sendo estes valores de vazão empregados no presente estudo.

7. MODELAGEM HIDRÁULICA

7.1 DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA

O modelo hidráulico bidimensional (2D) construído utilizou o software HEC-RAS, na sua versão 6.5, desenvolvido pelo HEC-USACE (*Hydrologic Engineering Center – U.S. Army Corps of Engineers*).

O HEC-RAS pode desenvolver simulações com um modelo unidimensional (1D) ou bidimensional (2D), de fundo fixo, sendo capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, onde poderão ocorrer mudanças dos regimes supercrítico para subcrítico ou de subcrítico para supercrítico. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidirecional.

O modelo numérico utiliza as equações de momento em situações em que o perfil da superfície de água varia rapidamente. Essas situações incluem ressaltos hidráulicos, escoamento em estruturas hidráulicas e as confluências. Permite, portanto, a avaliação do efeito de– pontes, galerias, barragens, diques, entre outros, na alteração na linha e superfície de energia na planície de inundação.

Para obtenção de sua solução hidráulica, o modelo possui a capacidade de transporte das formulações hidráulicas baseada em experimentos de cunho unidirecional e bidimensional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning (Equação 1).

Equação 1

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}{}_{h}$$

Onde:

V é a velocidade [m/s];

n é o coeficiente de rugosidade de Manning;

S é a declividade do escoamento [m/m];

Rh raio hidráulico [m].

A formulação numérica do modelo HEC-RAS é representada abaixo, baseada nas equações da conservação do momento de Saint. Venant (Equação 2).

Equação 2

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\beta Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial h}{\partial x}+A\frac{|Q|Q}{K^2}+q\frac{Q}{A}=0$$

$$B\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q$$

Onde:

"Q" é a vazão [m³/s];

"h" é a altura da coluna d'água [m];

x é a distância ao longo do rio [m];

"t" é o tempo [s];

"A" é a área da seção de escoamento [m²];

"B" é a largura da superfície de água [m];

"K" é capacidade de transporte [m³/s];

"g" é a aceleração da gravidade [m/s²];

"q" é o fluxo lateral [m³/s/m];

"β" é o fator de distribuição do fluxo [adim].

A formulação numérica da versão 2D, para representação do fluxo e hidrodinâmica da água na calha do rio e na planície de inundação, é baseada nas equações de conservação da massa e conservação do momento de Navier-Stokes (Equação 3).

Equação 3

$$\frac{\partial u}{\partial t}=f.v-g\frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=f.u-g\frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$\frac{\partial(H-h+\eta)}{\partial t}=-H\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

Onde:

"u" e "v" são as componentes horizontais da velocidade [m/s] na calha e planície de inundação;

"H" é a altitude média [m] da linha d'água;

“h” é o referencial topográfico do fundo [m];

“η” é a variação da coluna d’água no entorno da profundidade média;

“f” é o coeficiente de Coriolis.

Tais conceitos podem ser aplicados por meio de malhas capazes de promover soluções numéricas para as equações mencionadas e que serão tratadas, daqui em diante, como a geometria do modelo. Deste modo, o HEC-RAS caracteriza-se como sendo uma ferramenta versátil e estável, o que garante confiabilidade nos resultados obtidos, tornando-se um modelo consagrado mundialmente. As aplicações encontradas com uso do modelo hidráulico HEC-RAS podem ser consideradas diversas e consideradas como uma consolidação do uso amplo do modelo em diferentes regiões do mundo. (NASCIMENTO et al., 2000; ALCOFORADO; CIRILO, 2001; CALÇADA, et al., 2003; KNEBL et al., 2004; KOVACS et al., 2006; GUL et al., 2009; OLEYIBLO; LI, 2010; KOUTROULIS; TSANIS, 2010; SARHADI et al., 2012; FRANÇA; RIBEIRO, 2013; HEIMHUBER, 2013; NETO et al., 2015; NETO et al., 2016).

7.2 CENÁRIOS DE MODELAGEM

As simulações hidráulicas foram elaboradas a fim de avaliar a influência das estruturas de madeira na dinâmica das velocidades e profundidades do escoamento no rio Gualaxo do Norte. Ademais, o estudo em questão também tem o objetivo de fornecer informações de modo a subsidiar os estudos de estabilidade das estruturas, no capítulo seguinte.

Para tanto, foram considerados dois cenários para a modelagem:

- Cenário 1: MDT das margens e da calha do rio antes da implantação das estruturas de madeira. Esse cenário simula as condições naturais de escoamento nos trechos;
- Cenário 2: Diferença do MDT das margens e da calha do rio considerando a instalação das estruturas de madeira nas localizações predefinidas em relação ao Cenário 1. Esse cenário simula as condições de escoamento incrementais, após a instalação das estruturas.

Por fim, optou-se pela simulação em 2D, onde os dados geométricos, estruturais, hidrológicos e hidráulicos foram lançados no HEC-RAS bidimensional, para então iniciar os estudos hidrodinâmicos. As simulações executadas na modelagem hidráulica seguiram o fluxo de trabalho descrito a seguir:

- Desenvolvimento da geometria, contemplando MDT das margens e da calha do rio com e sem as estruturas, assim como elaboração de vetores de apoio e construção da malha ou grade de análise do modelo hidráulico;
- Definição das condições de contorno de entrada e saída, provenientes das vazões máximas de referência dos estudos hidrológicos disponíveis na região, assim como a declividade/energia fornecida pela batimetria;
- Obtenção e avaliação dos resultados, considerando simulação hidráulica de regime permanente de escoamento.

O MDT sem as estruturas de madeira foi desenvolvido a partir do levantamento planialtimétrico das margens e dos pontos de batimetria ao longo das seções levantadas. Por sua vez, o trecho do MDT que corresponde à calha do rio foi gerado a partir da interpolação entre cada uma das seções topobatimétricas. O método utilizado levou em consideração a posição da margem em cada uma das seções assim como a profundidade do talvegue. Por se tratar de 7 trechos diferentes, sendo 4 do Rio Gualaxo do Norte (RGN) e 3 tributários afluentes do mesmo, para avaliação, com diferentes condições de declividade, sinuosidade, entre outras características, foram utilizadas ferramentas adicionais como o software AutoCAD Civil 3D 2018 e QGIS 3.34, para execução de manipulações vetoriais e matriciais, visando cumprir os ajustes necessários para consolidação da geometria do modelo.

Após ajustes nos MDT's sem estruturas e a inserção das mesmas por meio das ferramentas complementares mencionadas, puderam ser obtidos os MDT's modificados. As Figuras 14 a 20 apresentam, para fins de ilustração, apresentam alguns trechos do Modelo Digital de Terreno de cada região com as estruturas na calha do rio Gualaxo do Norte e tributários.

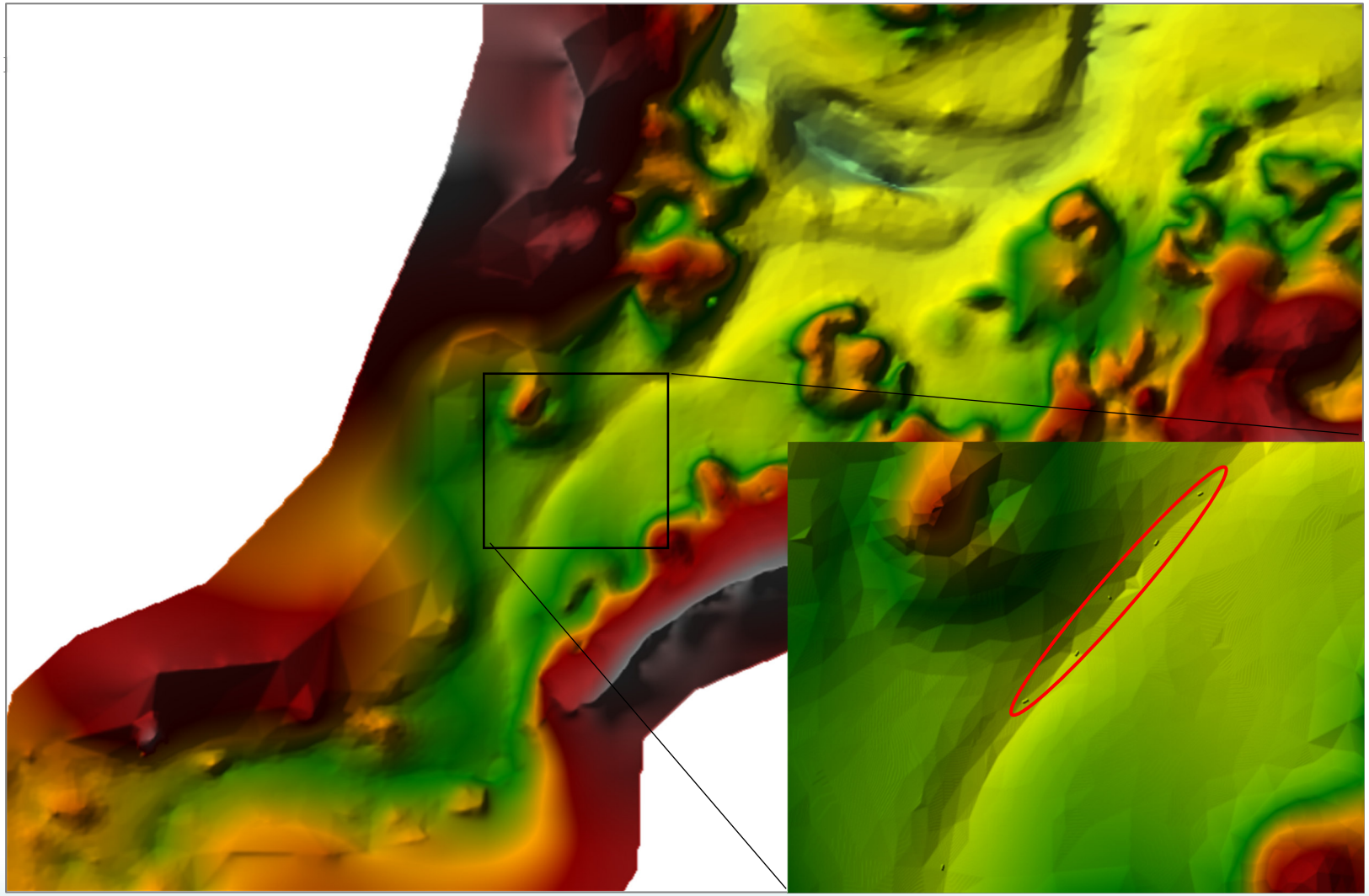
Ao todo inicialmente foram projetadas 164 estruturas de madeira ao longo de aproximadamente 3,57 km de trechos a serem renaturalizados, distribuindo-se 116 entre os trechos do RGN e 48 entre os tributários. O design de instalação das estruturas de renaturalização tanto no rio, quanto no tributário foi elaborado através de uma abordagem cuidadosa e adaptada às características específicas da hidrogeomorfologia e disponibilidade de habitats, metodologia descrita nos manuais da Agência de Proteção Ambiental Americana (United States Environmental Protection Agency – US-EPA) e nos protocolos estabelecidos para Avaliação de Habitat Físico pelo Programa de Monitoramento e Avaliação Ambiental

(Environmental Monitoring & Assessment Program, EMAP) (OLSEN; PECK, 2008) além das métricas e delineamentos propostos por Kaufmann et al. (1999).

Todo delineamento e execução proposto foi baseado através de guias internacionais de restauração fluvial, sendo as principais referências utilizadas: Brooks (2006); Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers (2012); Wheaton et al. (2019); Neuhaus, Mende (2021). O referencial teórico associado aos estudos na região (FUNDAÇÃO RENOVA e CH2M, 2017; 2018), à experiência com projeto pioneiro de renaturalização no Brasil, às inspeções em campo e aos resultados obtidos nas campanhas diagnósticas permitiu a definição do modelo conceitual.

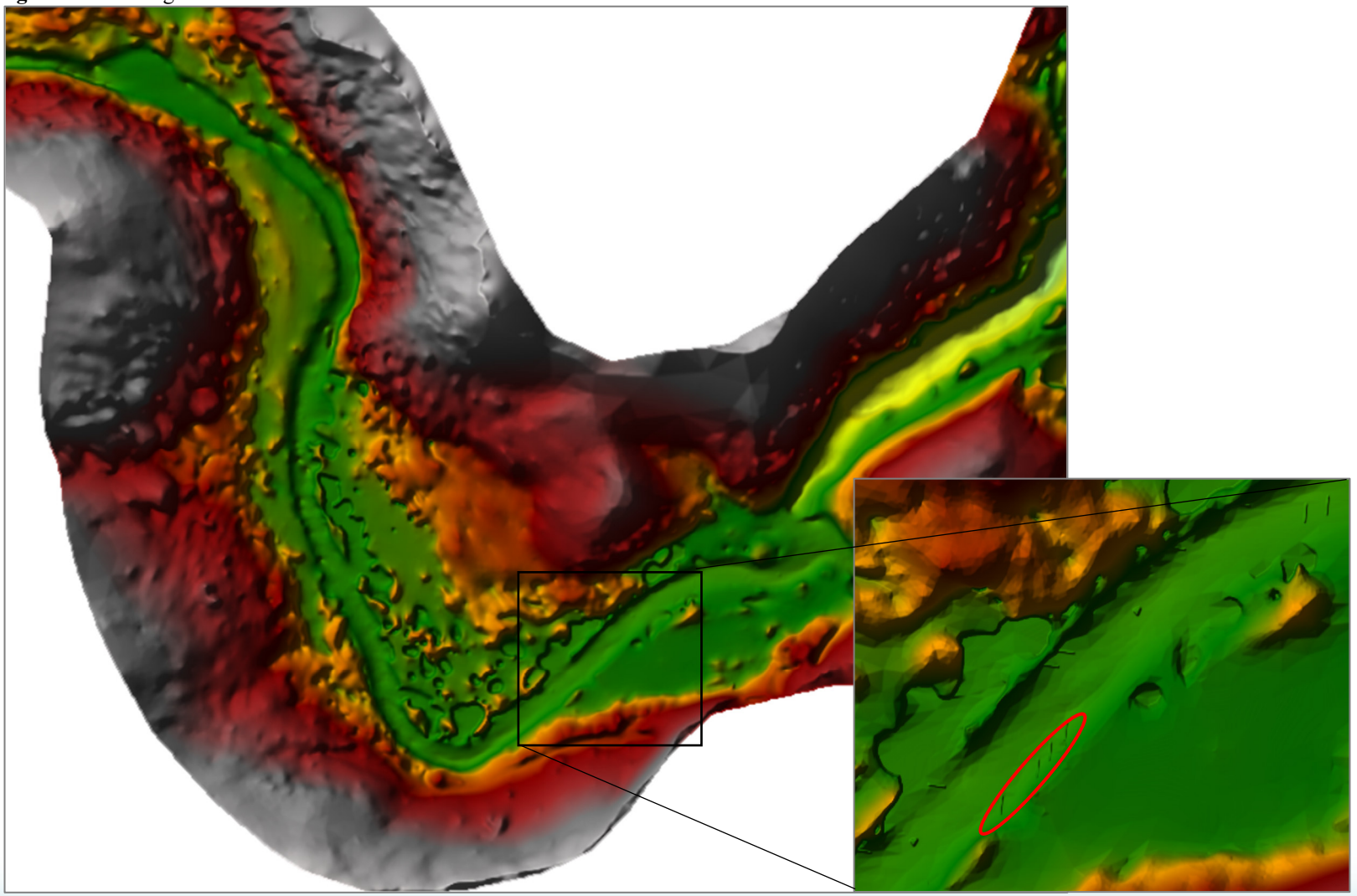
O grupo de estruturas tem por objetivos gerais a retenção de sólidos, formação de meandros, ajuda no combate a erosões nas margens, criação de hábitat, aumento da biodiversidade e da complexidade de fluxo. Quanto a critérios de seleção física, a inserção e posição das estruturas foram determinados com base diversos fatores, incluindo as dimensões adequadas em relação à largura do rio, que variam de acordo com os objetivos específicos da restauração, as condições locais e as características do próprio rio. Seguindo as diretrizes propostas por Brooks (2006), as estruturas selecionadas foram determinadas para abranger uma porção significativa da largura do rio para garantir a eficácia na criação de habitats, além de se integrarem harmoniosamente ao ambiente fluvial e serem espaçadas de forma apropriada com base na velocidade do fluxo da água e na extensão da área a ser restaurada. Aspectos hidráulicos e geomorfológicos, como profundidade, largura e velocidade do fluxo, também são considerados para garantir a resistência das estruturas às forças da água e promover condições adequadas para a vida aquática, adaptando-se às condições locais específicas de cada rio, como topografia, vegetação ripária e obstáculos naturais. O detalhamento das intervenções propostas no âmbito da renaturalização serão apresentadas no Relatório de Design, atualmente em elaboração com previsão de entrega em maio de 2024.

Figura 14 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do TG-11.



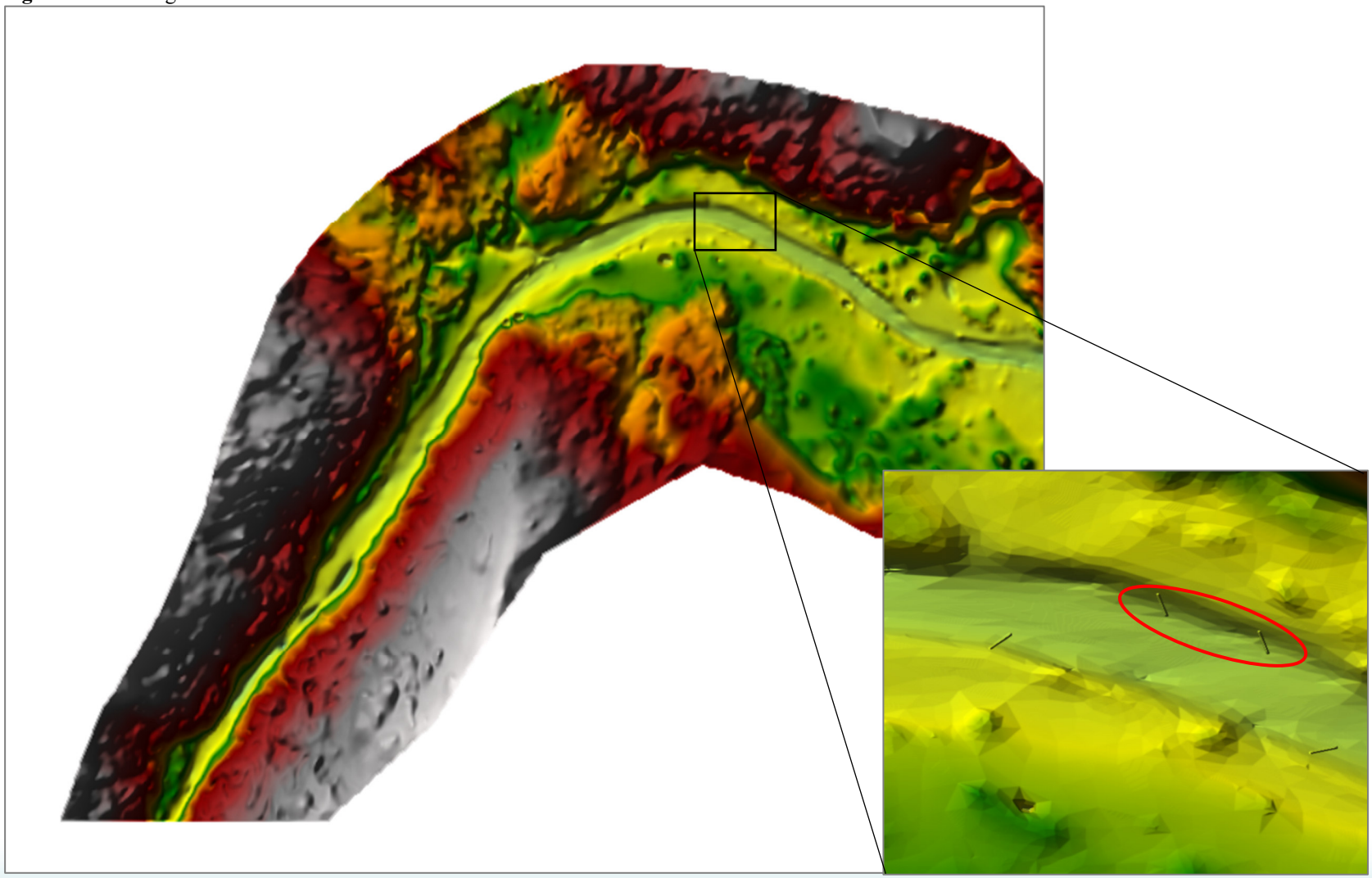
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 15 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do RGN-D.



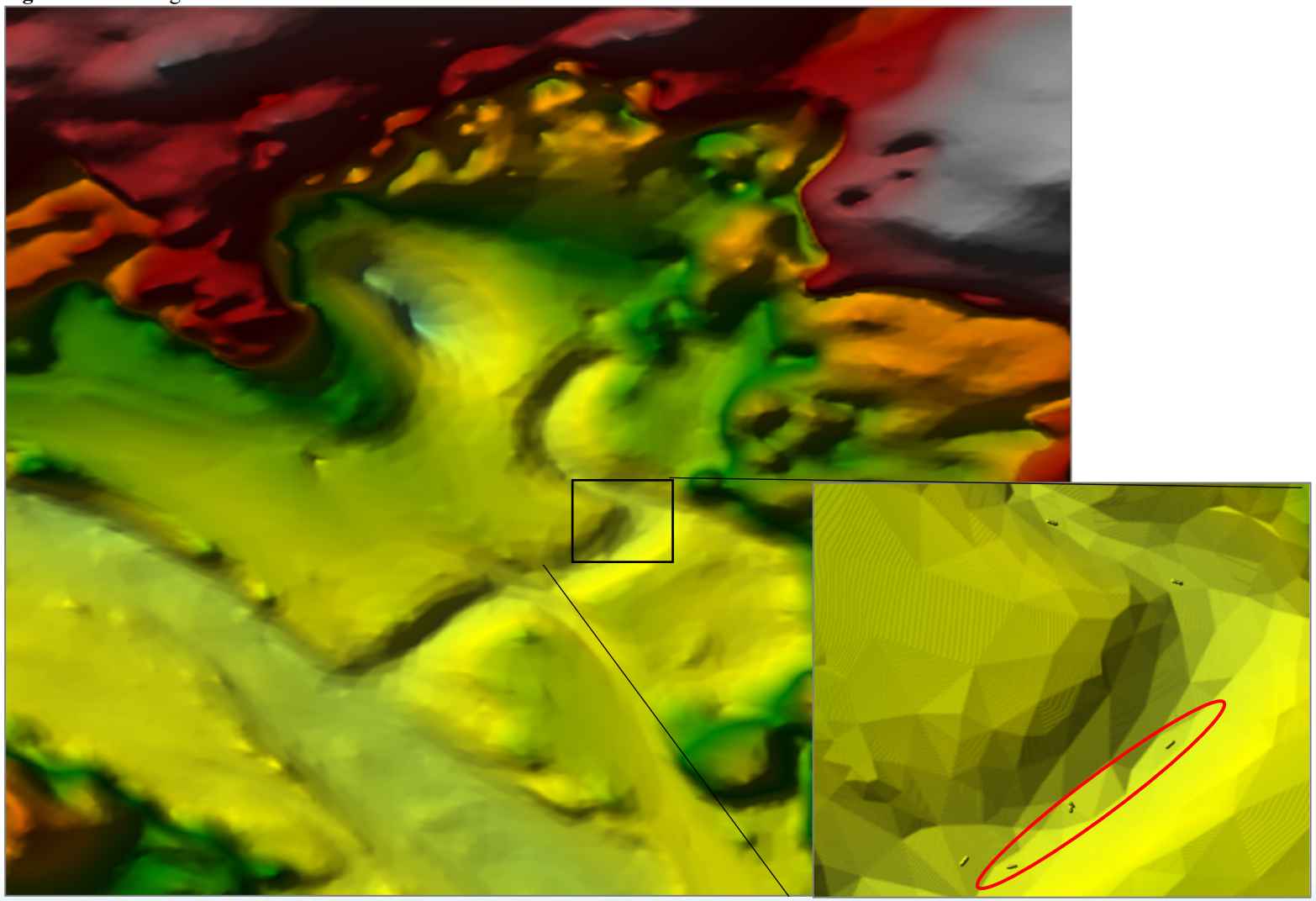
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 16 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do RGN-C.



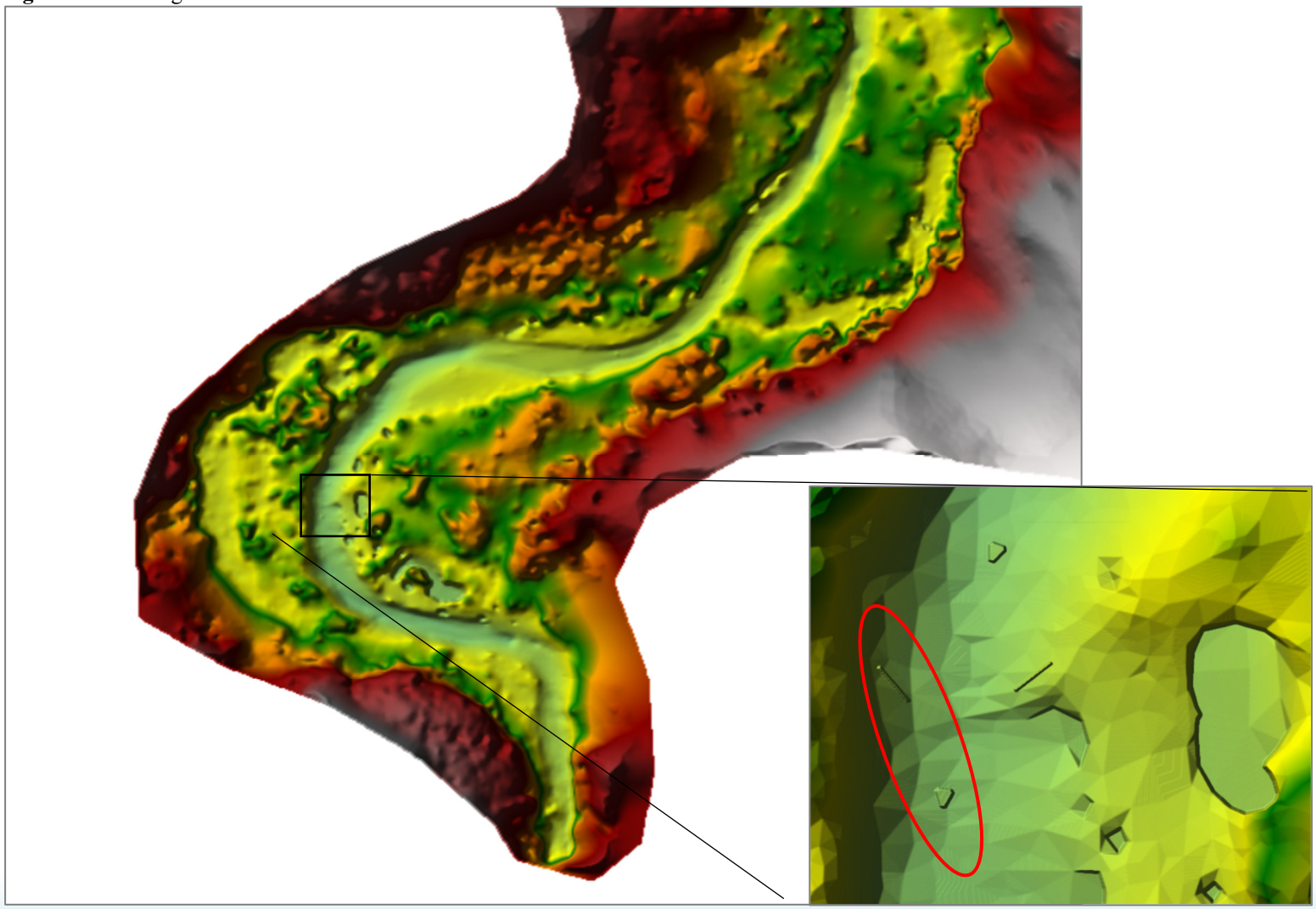
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 17 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do TG-16.



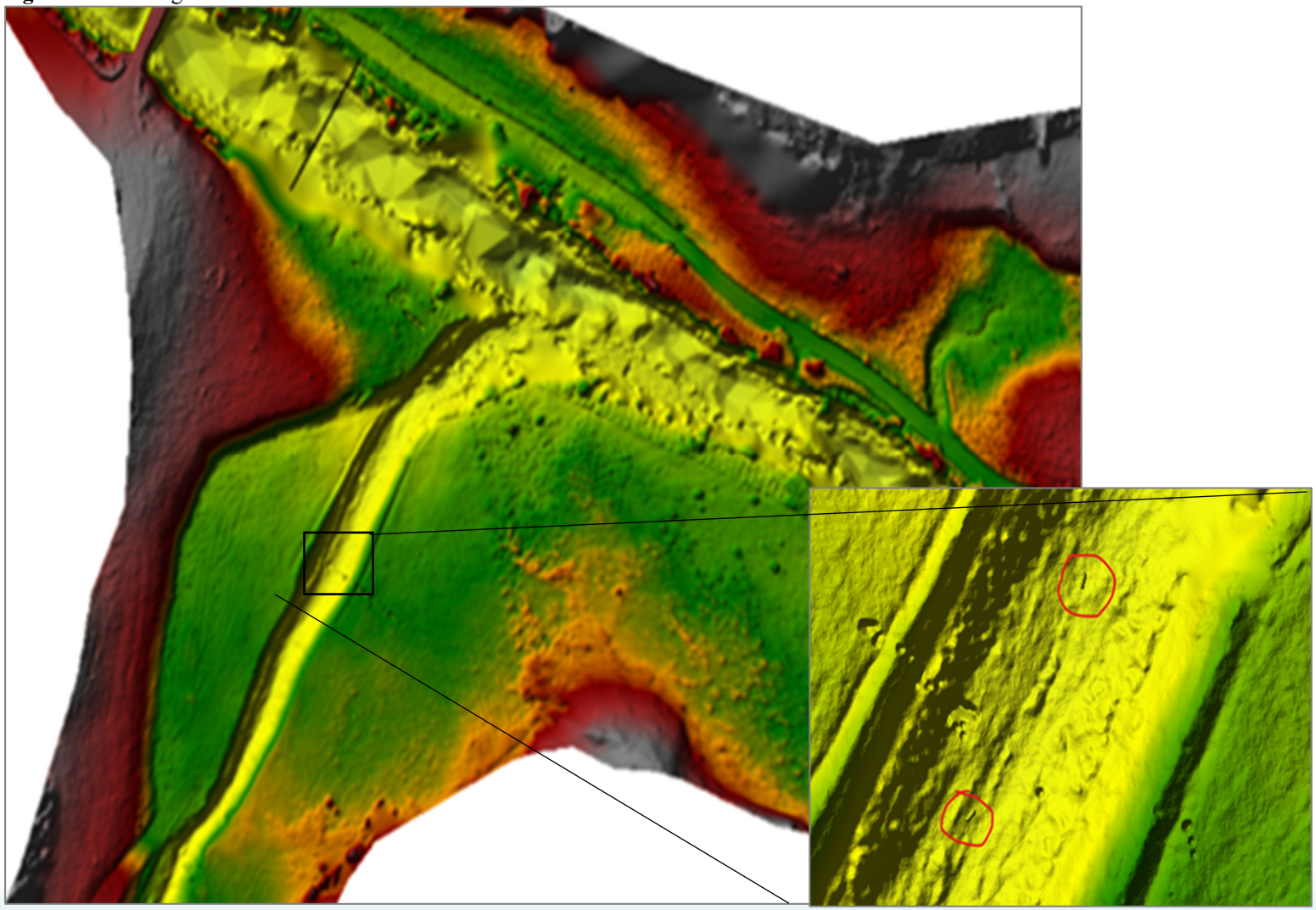
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 18 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do RGN-B.



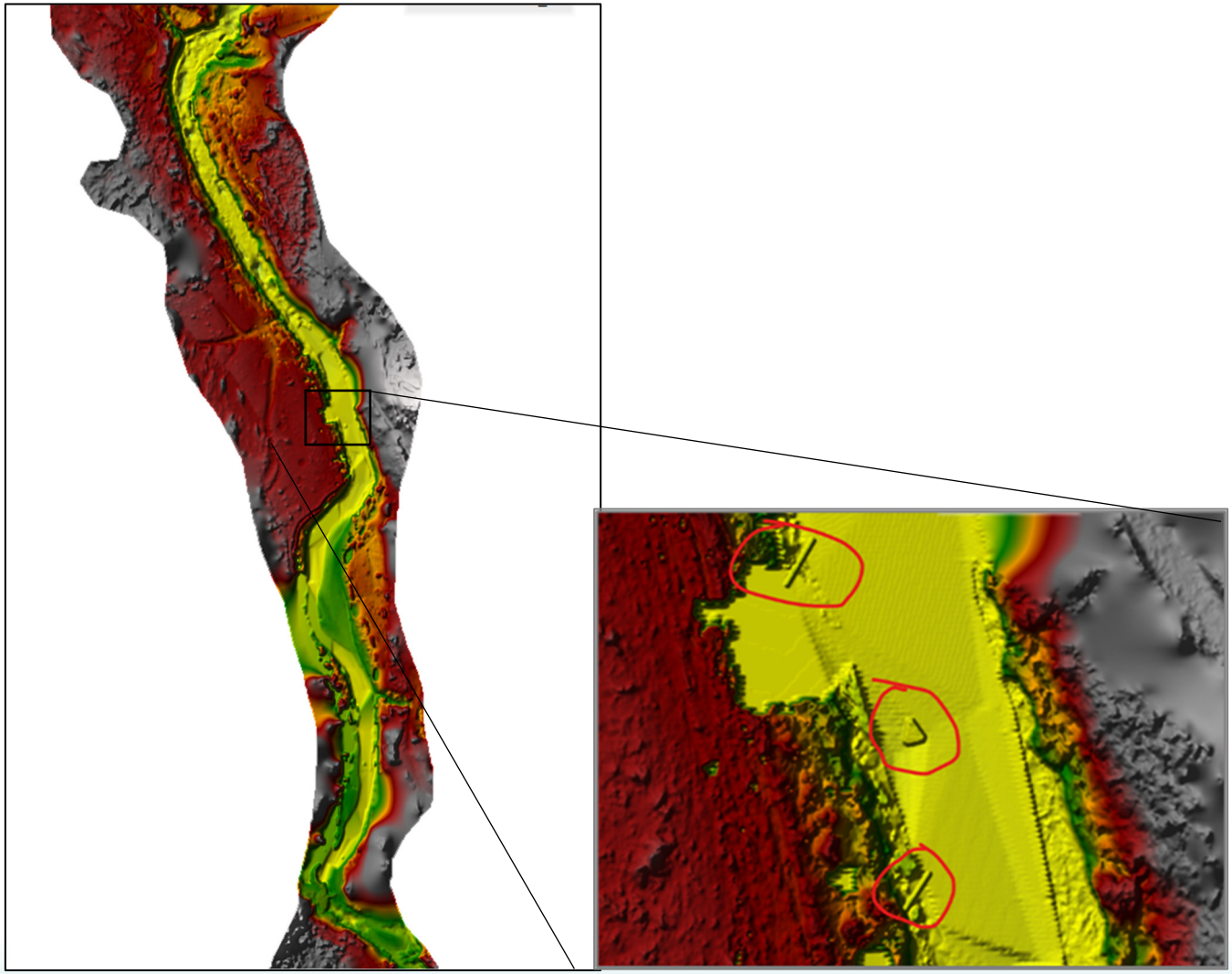
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 19 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do TG-29.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 20 - MDT gerado com as estruturas adicionadas a calha do RGN-A.



Fonte: Aplysia, 2024.

É importante ressaltar que a representação das estruturas no Modelo Digital de Terreno não consegue refletir de forma fiel a geometria real das estruturas, portanto, simplificações na sua incorporação à calha do rio foram feitas na descrição de cada tipo de estrutura, conforme ilustrado. Logo, suas dimensões como profundidade, largura e comprimento foram desenhadas de forma fidedigna, entretanto, em situações como as estruturas FG, TTX e TTV, explanadas a seguir, que possuem alguma característica específica que exige simplificação no desenho, foram consideradas apenas o delineamento das partes da estrutura que se encontram diretamente sobrepostas a calha do rio, sendo que onde ocorre sobreposição de troncos ou instalação de apenas galhos, tal simplificação foi implementada.

As estruturas podem ser divididas em cinco tipos de situações, sendo 2 tipos para o RGN e 3 tipos para os tributários:

(1) TMM – Tronco Marginal (Figura 21) – Tronco posicionado na margem do rio com o objetivo de criação de meandros, retenção de sólidos e criação de habitat. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,3 m, comprimento de 25% a 35% da largura do rio no local a ser instalada a estrutura e ângulo de aproximadamente 45° com a direção da margem (WOHL et al., 2010). No MDT essa estrutura foi representada na forma de um prisma de base quadrada com lado igual a 0,3 m e comprimento variável médio de acordo com as condições de largura das calhas dos trechos.

Figura 21 - TMM com as estruturas alocadas em campo (exemplo) e no HEC-RAS.



Fonte: Aplysia, 2024.

(2) ET – Estrutura em Triângulo (Figura 22) – Estrutura submersa composta por três (3) troncos formando um triângulo isósceles com o objetivo de criação de habitat. O dimensionamento da estrutura segue as diretrizes estabelecidas por Brooks (2006), que preconiza que o tamanho da estrutura deve estar diretamente relacionado com a largura média do rio, não excedendo 35% da largura total do curso d'água. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,3 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 1,5 m e comprimento dos outros dois elementos de aproximadamente 2,0 m. Essa estrutura deverá ser posicionada na direção do escoamento. No MDT essa estrutura foi representada na forma de um único sólido contemplando os três elementos que formam o triângulo. A seção transversal de cada um dos troncos pode ser representada como um quadrado de lado igual a 0,3 m e comprimento variável médio de acordo com as condições de largura das calhas dos trechos.

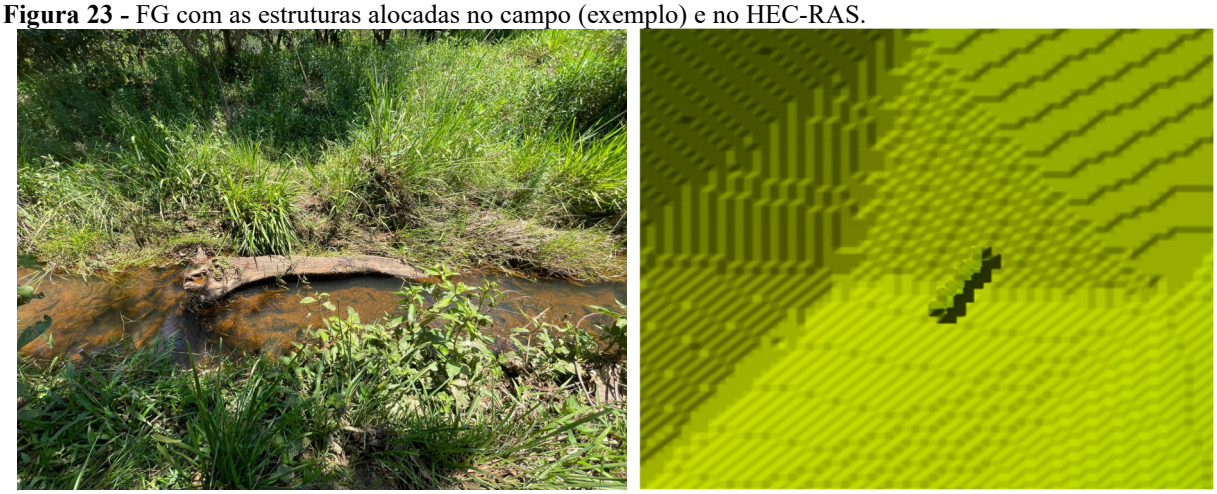
Figura 22 - ET com as estruturas alocadas em definitivo no campo e no HEC-RAS.



Fonte: Aplysia, 2024.

(3) FG – Feixes de Galhos (Figura 23) - Destinada aos tributários, se trata de uma estrutura submersa composta por pequenos feixes de galhos com ângulo de 30º à margem do tributário com o objetivo de criação de habitat. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 30% da largura média da calha. Essa estrutura deverá ser posicionada 30º na direção do escoamento.

Figura 23 - FG com as estruturas alocadas no campo (exemplo) e no HEC-RAS.



Fonte: Aplysia, 2024.

(4) TTX – Estrutura Cruzada (Figura 24) – Destinada aos tributários, se trata de uma estrutura parcialmente submersa composta por pequenas árvores e feixes de galhos formando um X visto de cima, entretanto com o primeiro tronco 90º em relação ao escoamento e o segundo enviesado em 45º em relação ao escoamento, permitindo que o fluxo escoe na forma cruzada, sendo ambos inseridos apenas em partes no perfil da calha do rio, ao ficarem apoiados nas margens, com o objetivo de criação de habitat. Nesse contexto, o desenho simplificado do MDT não ilustra as partes suspensas das madeiras e, ao mesmo tempo, garante que a hidrodinâmica da realidade seja representada na geometria do modelo. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 30% da largura média da calha. Essa estrutura foi prevista posicionada 30º na direção do escoamento.

Figura 24 - TTX com as estruturas alocadas no campo (exemplo) e no HEC-RAS.



Fonte: Neuhaus; Mende, 2011.

(5) TTV – Estrutura Transversal (Figura 25) - Destinada aos tributários, se trata de uma estrutura parcialmente submersa composta por dois troncos de pequenas árvores, com ângulo de 90º, sendo transversal ao escoamento e barrando 50% da largura da calha em seu centro ocasionando a divisão de 25% do escoamento para ambas as margens do tributário, justificando assim o formato do desenho simplificado no fundo da calha no MDT. Da mesma forma que a estrutura anterior, não ilustra as partes suspensas das madeiras e, ao mesmo tempo, garante que a hidrodinâmica da realidade seja representada na geometria do modelo. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 50% da largura média da calha.

Figura 25 - TTV com as estruturas alocadas no campo (exemplo) e no HEC-RAS.



Fonte: Neuhaus; Mende, 2011.

Em seguida, foi dado sequência na geração da malha 2D no modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D, se utilizando de uma malha irregular de elementos majoritariamente quadráticos. A sua resolução afeta diretamente os resultados do modelo e o tempo de processamento. A grade utilizada para as simulações no modelo hidrodinâmico, foi de 1 x 1 metro, de maneira geral, variando desde aproximadamente 200 mil células para as malhas dos tributários menores até mais de 2 milhões de células para os trechos maiores do rio Gualaxo do Norte.

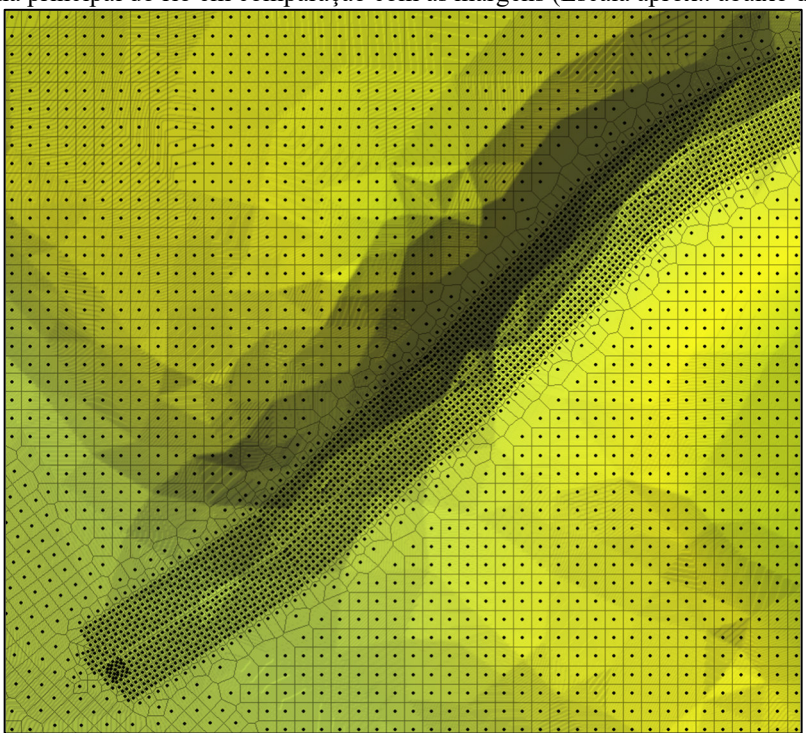
Prezando por qualidade para os cálculos, e visando realizar seu refinamento foram utilizadas ferramentas como *Breaklines* e *Refinement Regions* ao longo da calha do rio de todos os trechos de interesse, diferenciando-os de áreas adjacentes, a fim de garantir a fidelidade da avaliação posterior de mapas de velocidades, assim como avaliação da estabilidade das

estruturas nas calhas de rio estudadas. Além disso, o passo de tempo ou *time step* utilizado foi em geral de 0,1 a 0,4 segundos, e o *Courant Number,* coeficiente responsável por definir a convergência ao resolver numericamente equações parciais diferenciais como a de condição de velocidade da onda de inundação (*Flood Wave Speed*) a um valor ótimo próximo de 1, por exemplo, automatizado de maneira a garantir a estabilidade numérica. A utilização da mesma grade para todos os cenários estabiliza as condições numéricas do modelo, de forma que as diferenças encontradas entre os resultados das simulações são unicamente, resultado das alterações de escoamento para cada um deles.

Observando a significância do tamanho do elemento e também o esforço computacional (duas regiões distintas ilustradas na Figura 26), optou-se por permanecer utilizando uma malha geral com espaçamento entre os elementos de 1,0 m e refinada dentro da calha do rio com elementos de 0,3 m. Pontualmente, foram realizados detalhamentos da ordem de 0,1m, devido ao tamanho menor das calhas dos tributários e respectivas estruturas menores dos mesmos, entretanto, não demonstrou desempenho superior em grande parte dos trechos. Por este motivo, desta vez, com o detalhamento de 0,3m já realizado para área de toda a calha (em APLYSIA, 2020c, somente ao redor das estruturas) dos trechos dos tributários à montante e jusante das estruturas implementadas, observou-se o atendimento pleno das premissas para as soluções numéricas esperadas, sem necessidade de reduzir mais o tamanho dos elementos da malha.

Tais definições também levaram em conta os pontos de nível d'água ao longo das geometrias estudadas nos relatórios anteriores (APLYSIA, 2020c) a fim de avaliar diferenças nos resultados entre diferentes malhas, assim como foi levada em conta a experiência do hidrólogo na ferramenta utilizada.

Figura 26 – Exemplo da malha utilizada nas simulações do trecho RGN-D onde é possível observar um melhor refinamento na calha principal do rio em comparação com as margens (Escala aprox.. abaixo de 1:10).



Fonte: Aplysia, 2024.

É possível observar nas duas regiões distintas: a primeira com elementos quadráticos de lado igual a 1,0 m (elementos maiores, fora da calha do rio), e uma segunda região, localizada ao longo da calha do rio, que apresenta elementos quadráticos com lado igual a 0,3 m (elementos menores). Ainda na etapa de preparação da geometria do modelo hidráulico, foram avaliados os coeficientes de rugosidade de Manning utilizados para os trabalhos desenvolvidos no trecho 9 do PER (APLYSIA, 2020c) onde foram adotados com base na literatura consagrada (CHOW, 1959) e imagem aérea levantada através de drone e nas observações da visita de campo, mesmas informações disponíveis para o presente relatório. Foram valores adotados para a calha central do rio: 0,035; Planície de inundação com arbustos e pequenas árvores: 0,05; Planície de inundação com árvores de médio porte espaçadas: 0,080; Planície de inundação com vegetação densa e consolidada: 0,11; e, por último, Solo exposto: 0,035.

A fim de se entender a variabilidade dos resultados a partir dos coeficientes de rugosidade, na análise de sensibilidade realizada ao longo dos relatórios mencionados, tendo sido realizadas diferentes simulações com redução e aumento nos coeficientes, de maneira geral, as diferenças máximas de velocidade (incrementais) se mantiveram praticamente com a mesma magnitude, em cerca de 0,3 m/s nas extremidades das estruturas, optando-se por manter

aqueles inicialmente propostos. O maior detalhamento da metodologia de tal análise de sensibilidade pode ser encontrado em APLYSIA (2020c).

Portanto, para o presente caso, optou-se por utilizar os mesmos coeficientes inicialmente implementados no modelo, tendo em vista que a modelagem realizada será em regime permanente de escoamento.

7.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para execução das simulações, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D exige que sejam definidas condições de contorno de entrada (montante) e de saída (jusante).

As vazões de cheias foram definidas como as condições de contorno de montante para tempos de recorrência (TRs) de 2, 25 e 50 anos, enquanto a profundidade normal do escoamento, que é representada pela declividade (ou linha de energia) na porção final de cada trecho seguiu o identificado nas cotas e planialtimetria da geometria construída, sendo definida como condição de contorno de jusante.

No presente estudo, a condição de contorno escolhida foi a profundidade normal do escoamento, representada pela declividade média do trecho em estudo, e, dessa forma, a declividade média na porção final do modelo foi estimada a partir dos pontos batimétricos disponibilizados, ao calcular as diferenças de cotas e comprimentos de cada trecho (Tabela 1).

Vale ressaltar que para os casos dos três tributários estudados foram avaliadas duas (2) situações em que os mesmos obtêm um evento extremo. A primeira, quando o evento ocorre apenas em sua bacia de drenagem, de forma a isolar os impactos nas estruturas e garantir que sejam exclusivamente do escoamento dos tributários, sem interferência de remanso do rio Gualaxo do Norte (RGN). A segunda situação, quando o fenômeno de remanso é explorado nas simulações, e pode se verificar a influência com a entrada de vazão negativa e interferência direta nas estruturas dos tributários mais próximas da foz. Deste modo, na primeira situação, foram consideradas nas condições de montante do RGN, vazões baixas a ponto de não produzir efeito de remanso nos tributários estudados, enquanto na segunda situação, foram mantidos TR’s do RGN de mesma proporção aos tributários.

Por fim, também se verifica que a calibração do coeficiente de rugosidade hidráulica não se faz possível seguindo um processo de calibração do modelo tradicional. Isso ocorre devido à ausência de dados de nível d’água medidos em um evento real nos trechos de interesse.

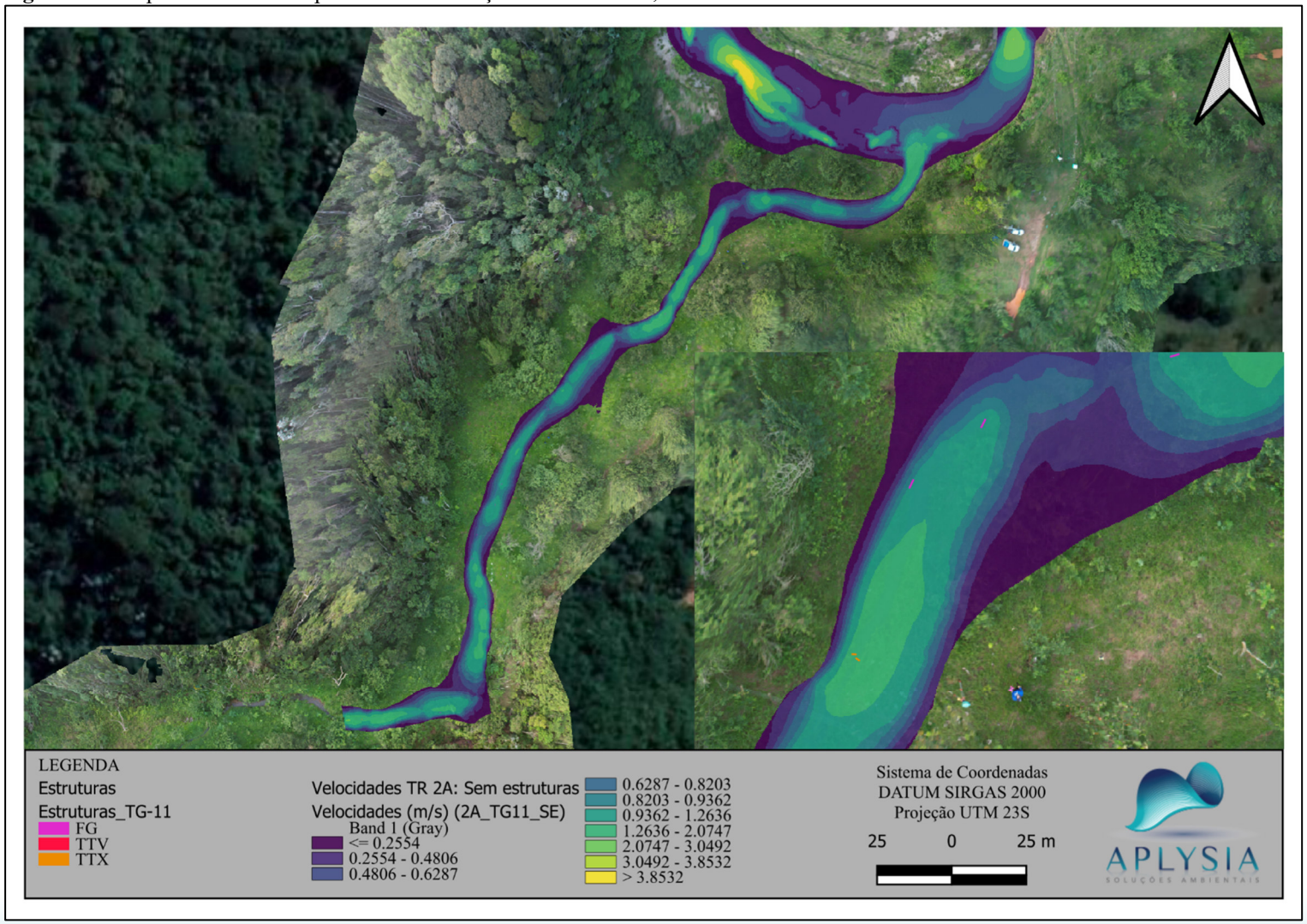
Entretanto, puderam ser feitas algumas verificações e validações do modelo, por meio da análise de sensibilidade mencionada anteriormente e conferências de velocidade e fluxo em pontos vistoriados durante o levantamento planialtimétrico e batimétrico, de forma a validar coerência do modelo, assim como, ao mesmo tempo, contemplar o atendimento a coeficientes de convergência e estabilidade numérica como o *Courant Number*, em torno de 0,5 a 2,0.

7.4 OBTENÇÃO DE RESULTADOS - ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE VELOCIDADES NAS ESTRUTURAS

Inicialmente foram gerados os mapas de velocidades para as cheias com tempos de retorno de 2, 25 e 50 anos para ambas as condições (mapas em layout) e com destaque para algumas regiões (mapas em destaque ou zoom), de modo a avaliar condições mais severas em que se espera que as estruturas, de maneira geral, possam resistir. Vale ressaltar que também foi acrescentado para os tributários um cenário extra referente ao fenômeno de remanso, visando representar a complexidade que as estruturas nos tributários poderão contemplar.

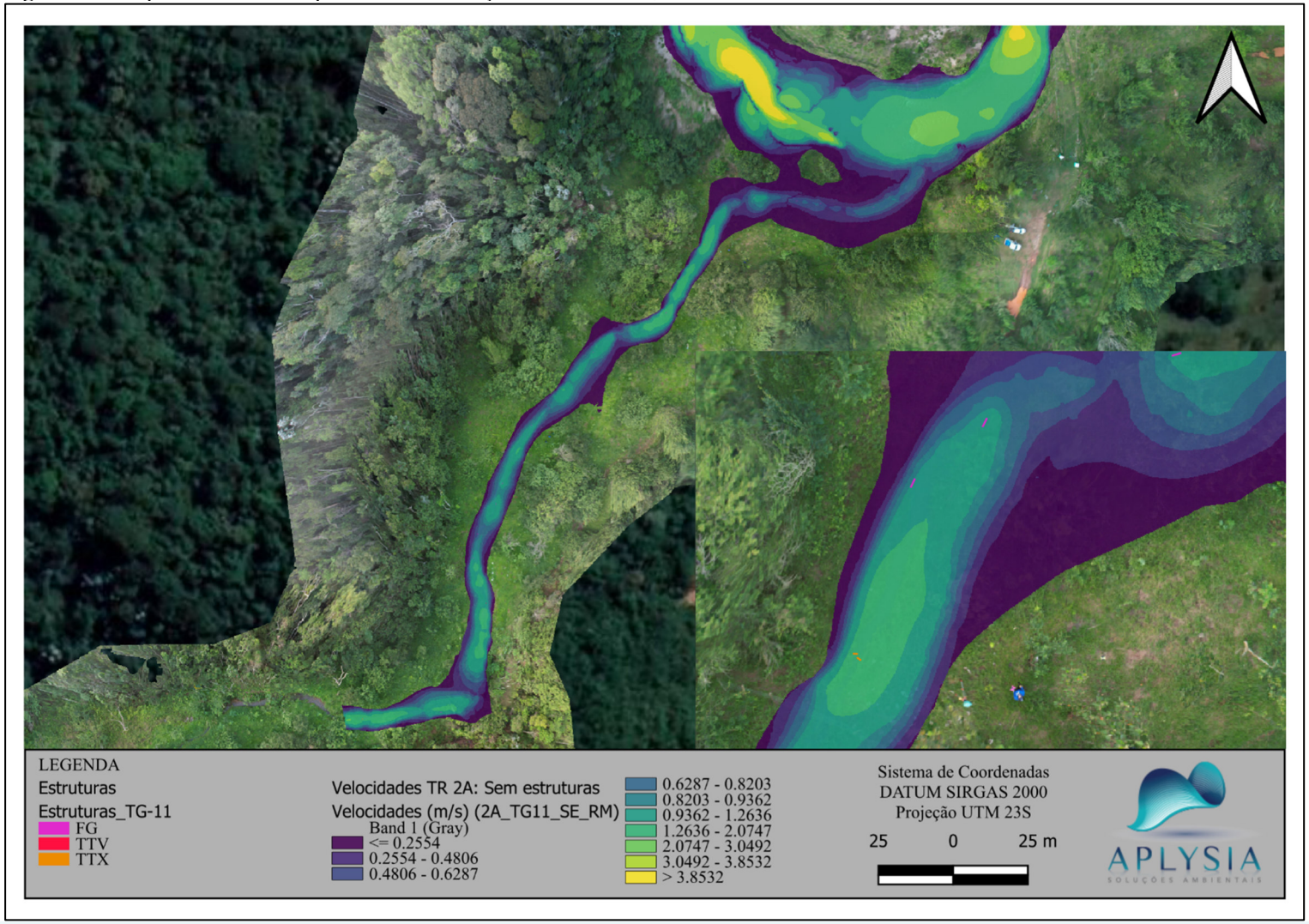
As Figuras 27 a 56 apresentam uma visão geral individual dos resultados obtidos. Em seguida, foram gerados mapas de velocidades incrementais nas Figuras 58 a 62, com as diferenças encontradas nos trechos, simulando o cenário pós-instalação das estruturas.

Figura 27 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



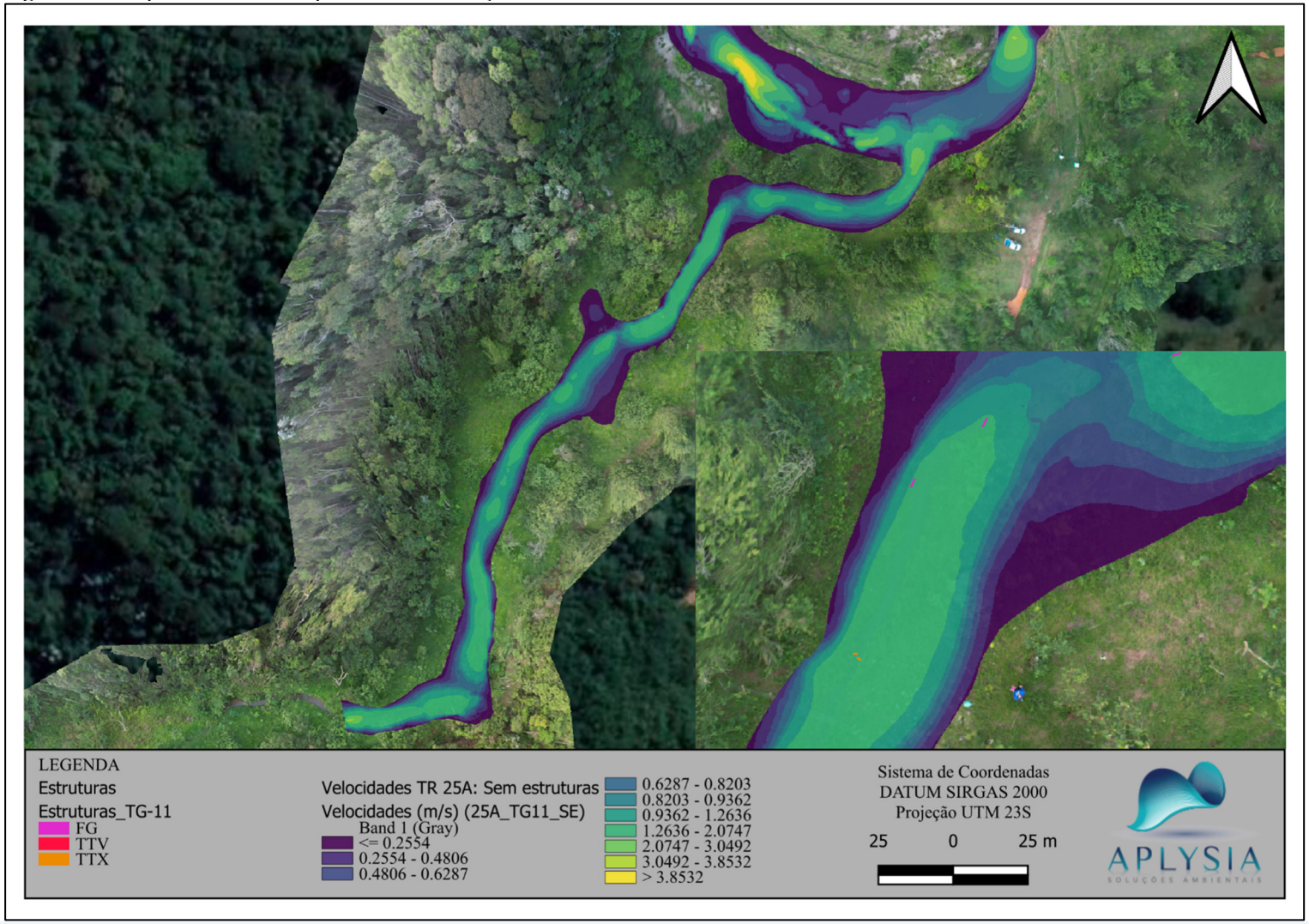
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 28 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



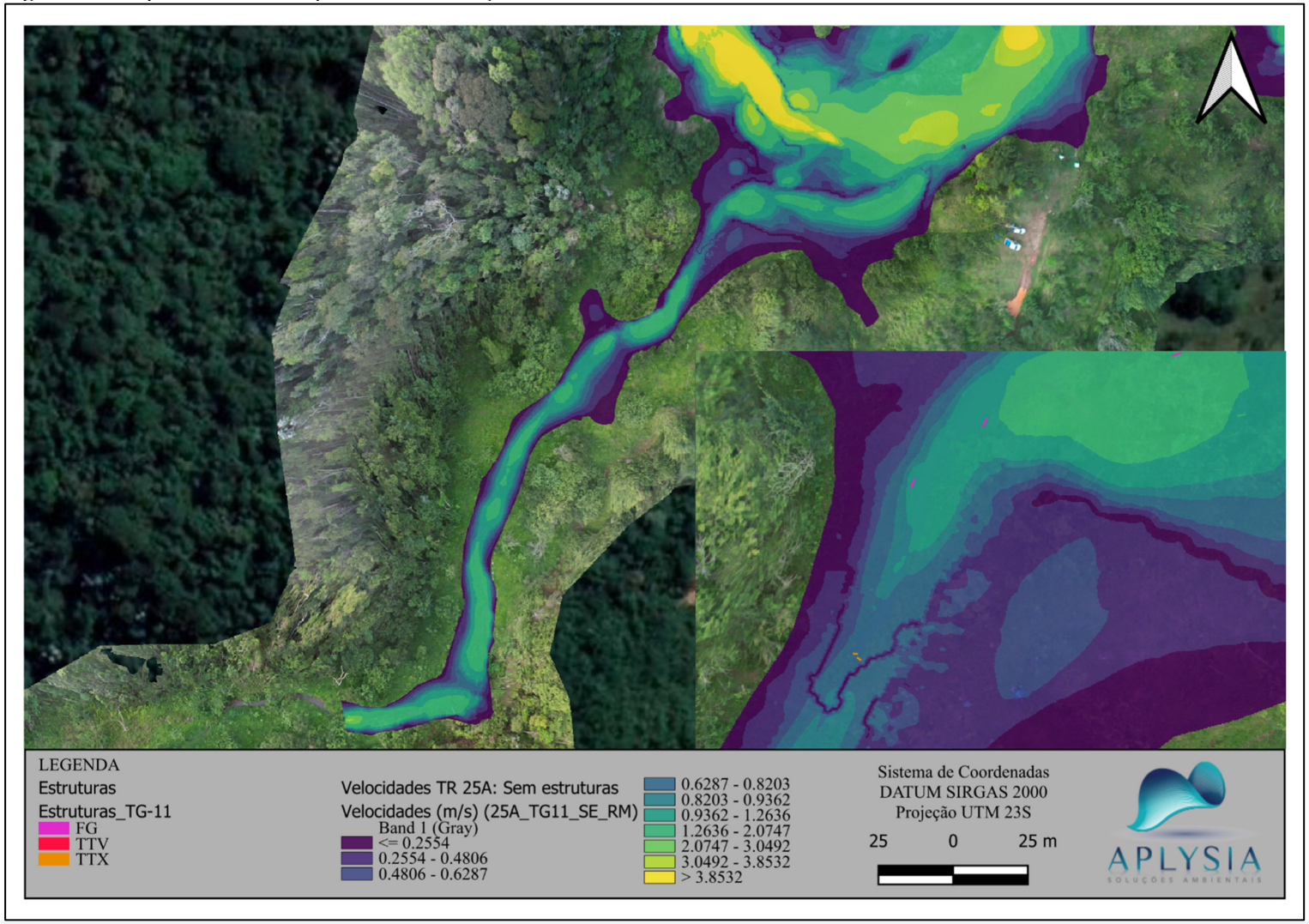
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 29 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



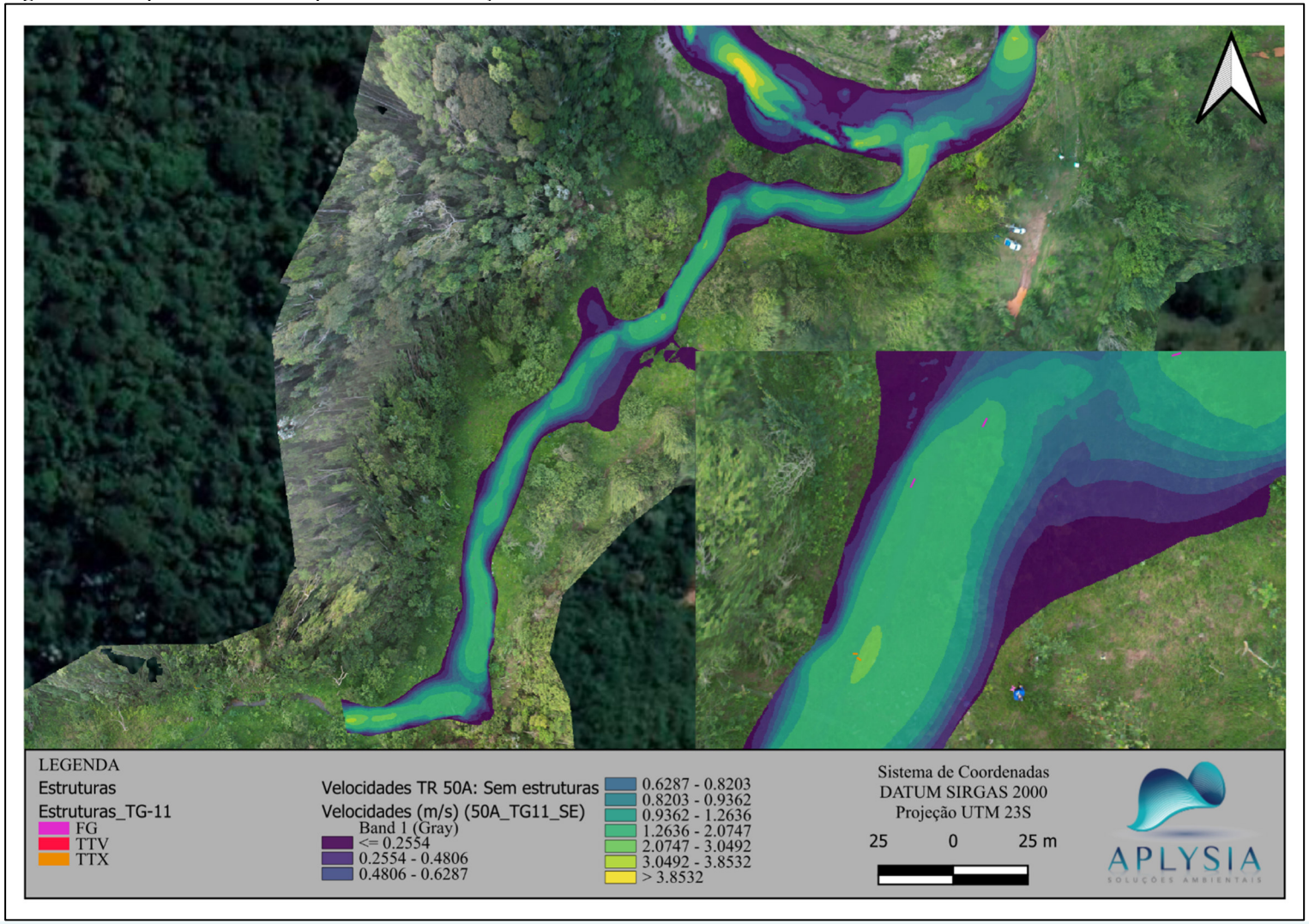
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 30 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



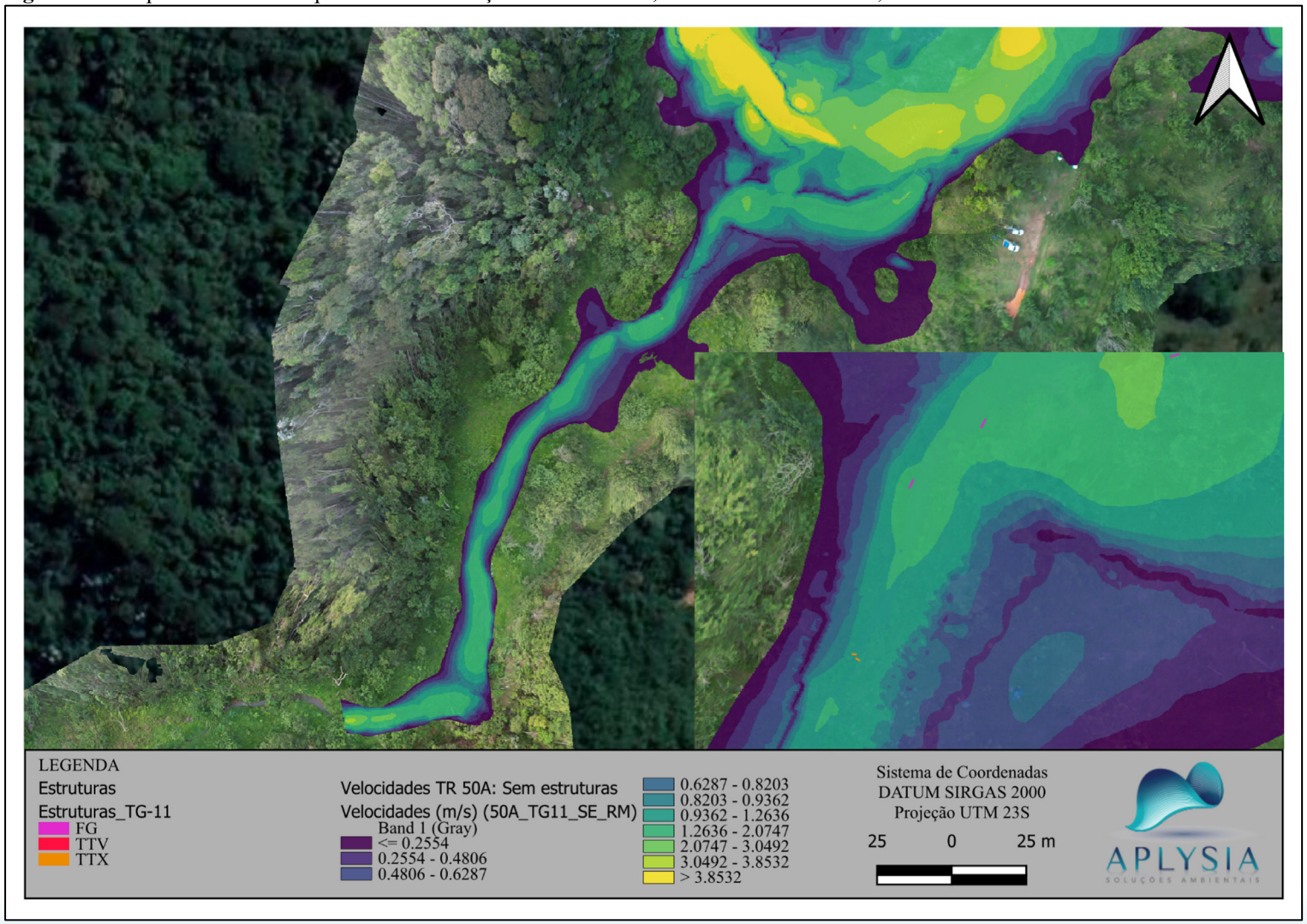
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 31 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



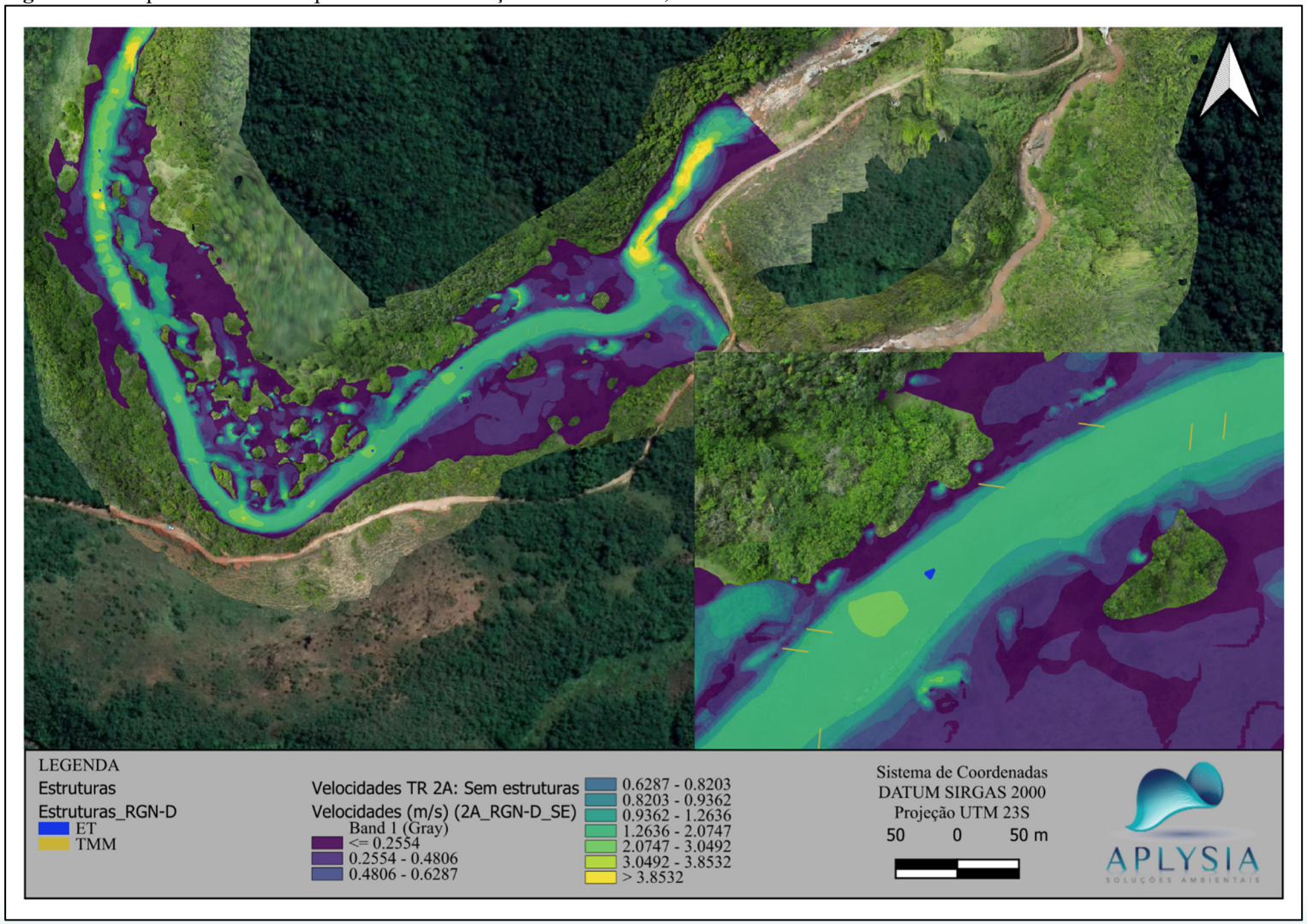
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 32 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



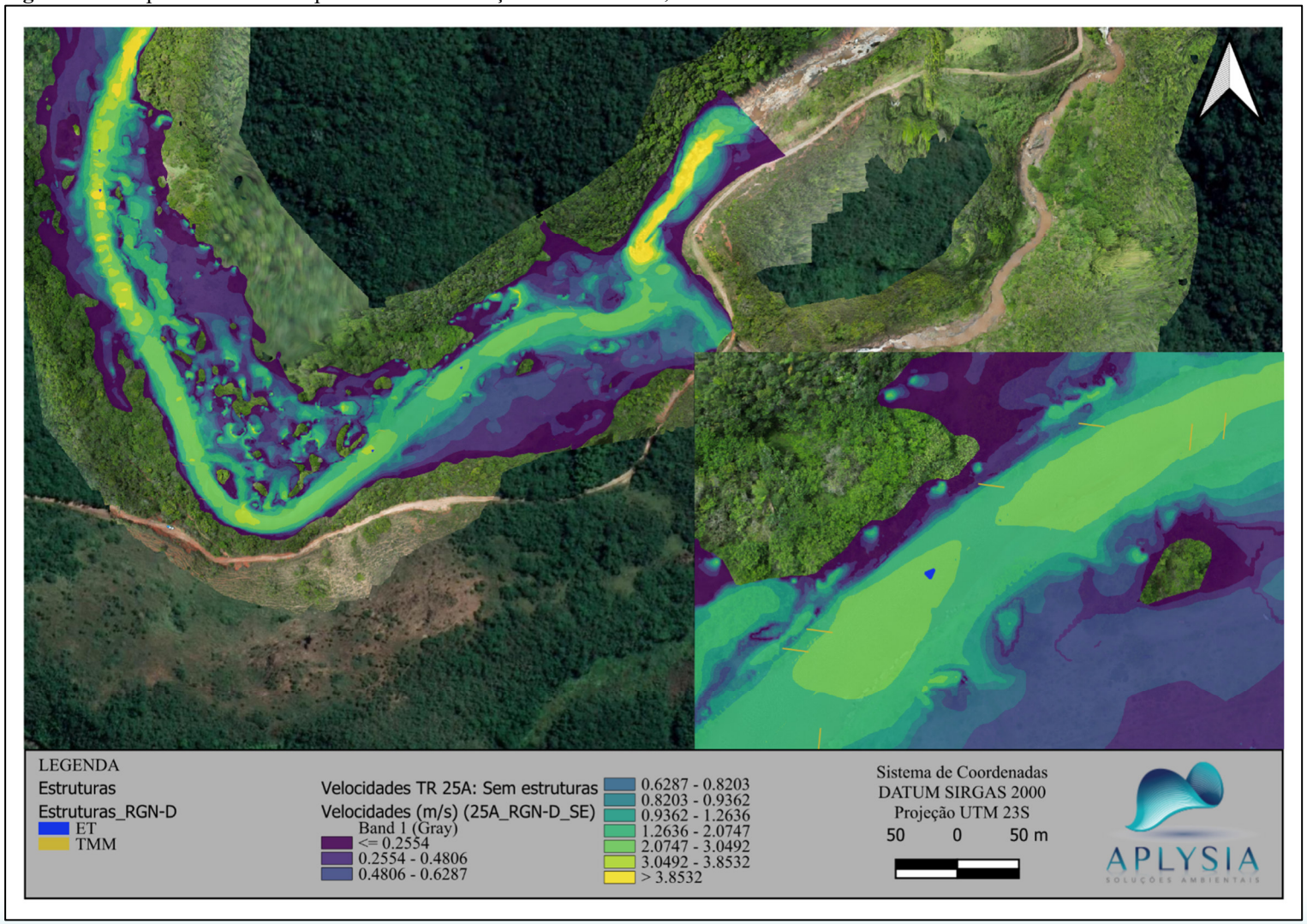
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 33 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



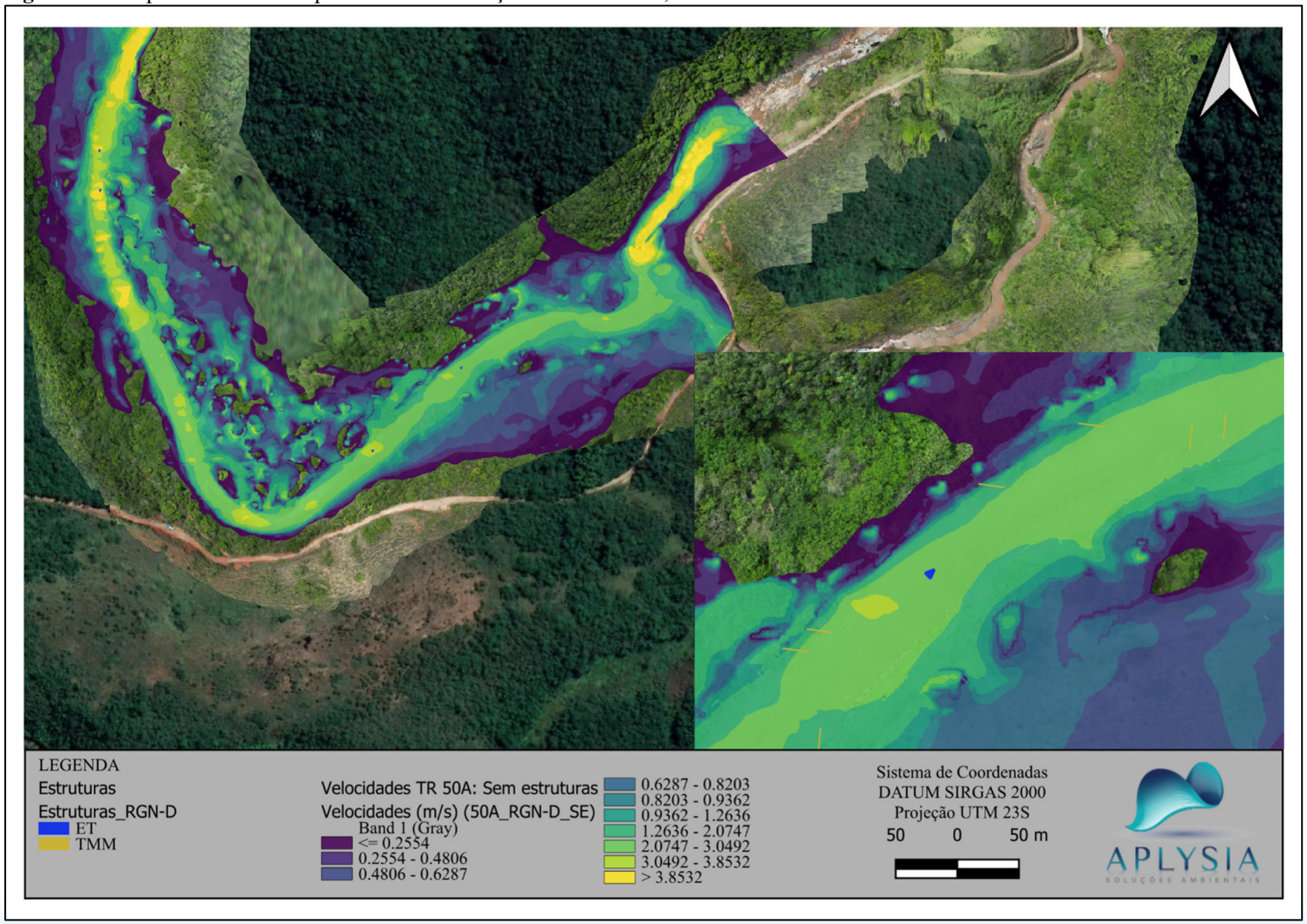
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 34 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



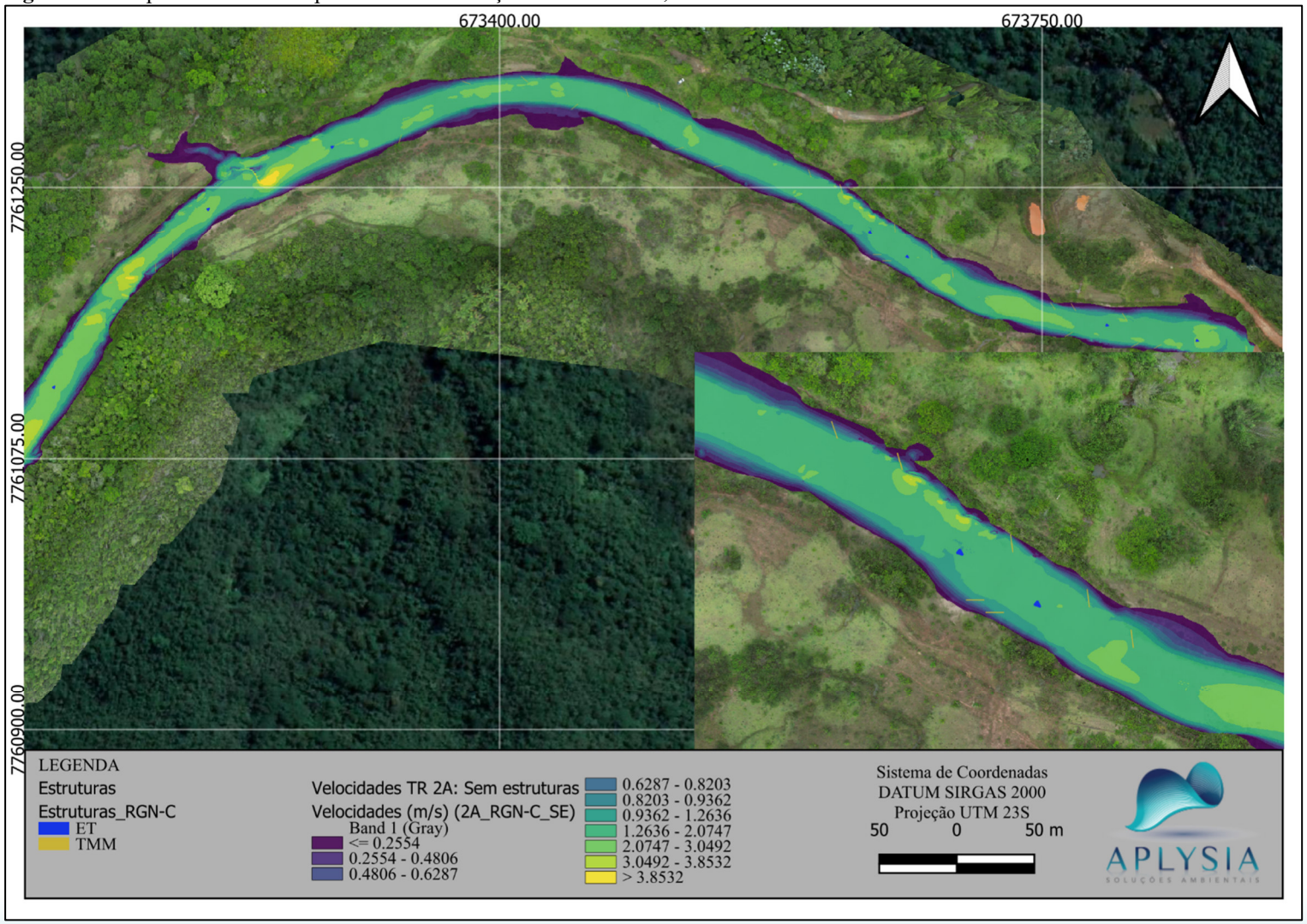
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 35 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



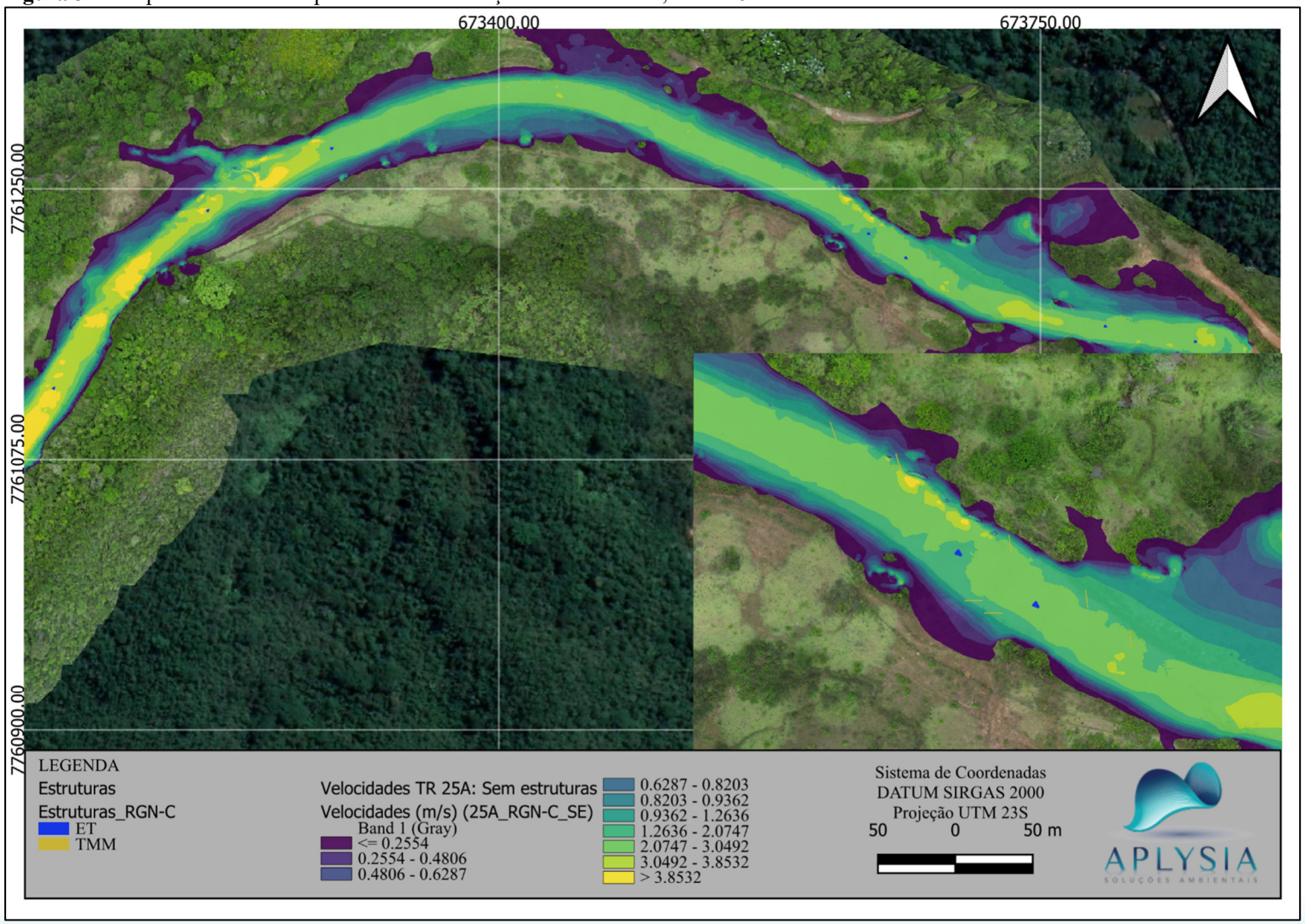
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 36 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



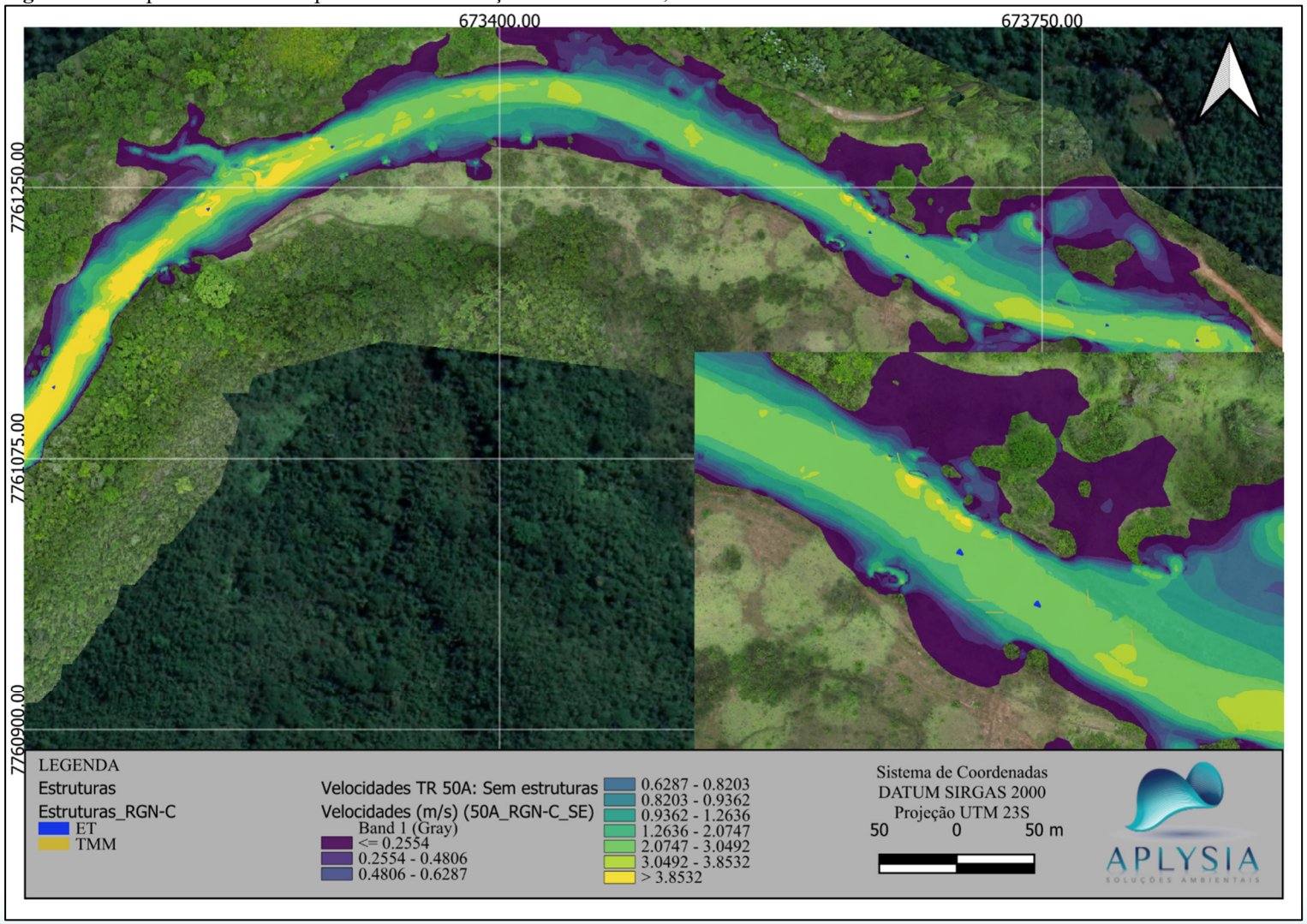
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 37 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



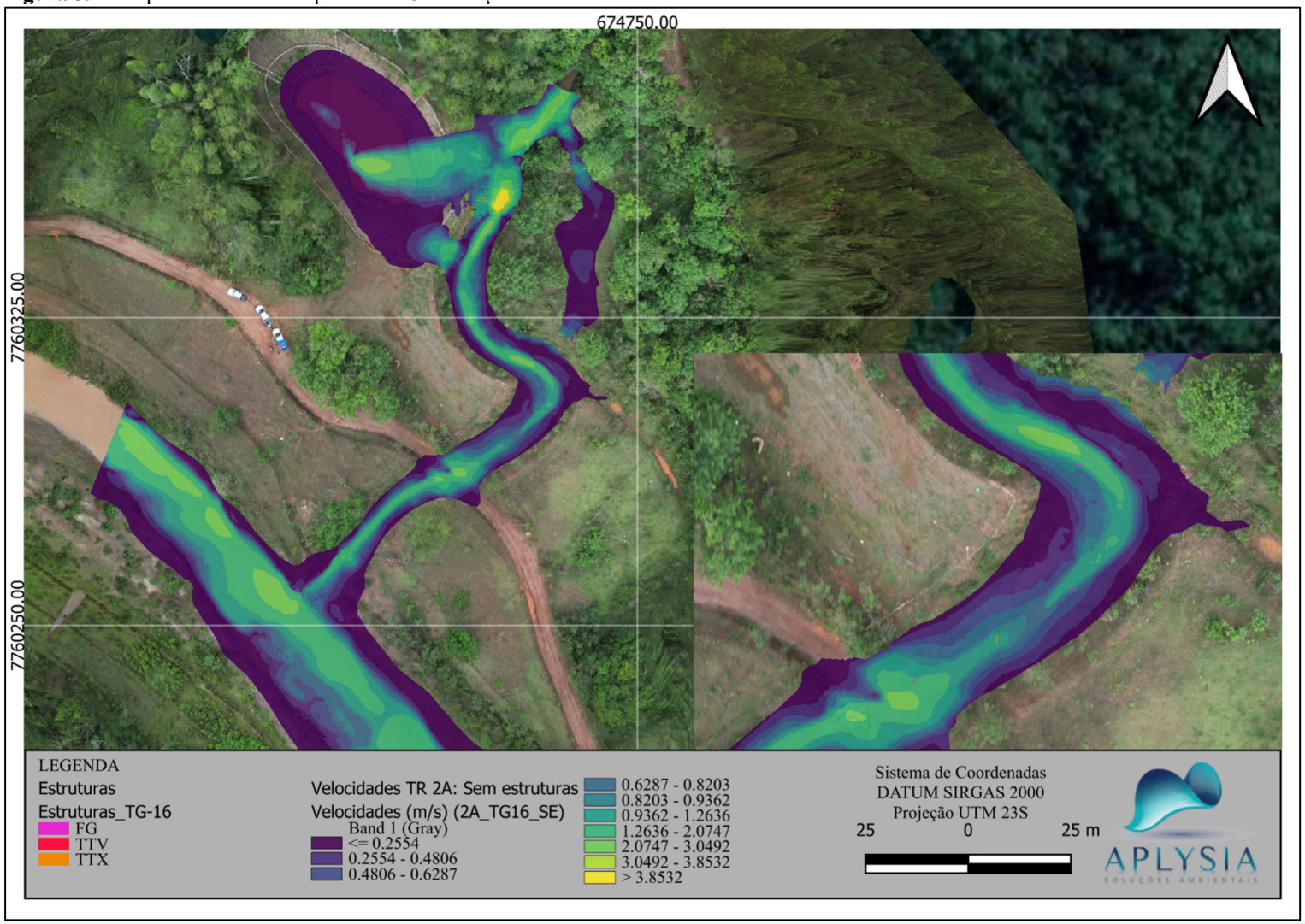
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 38 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



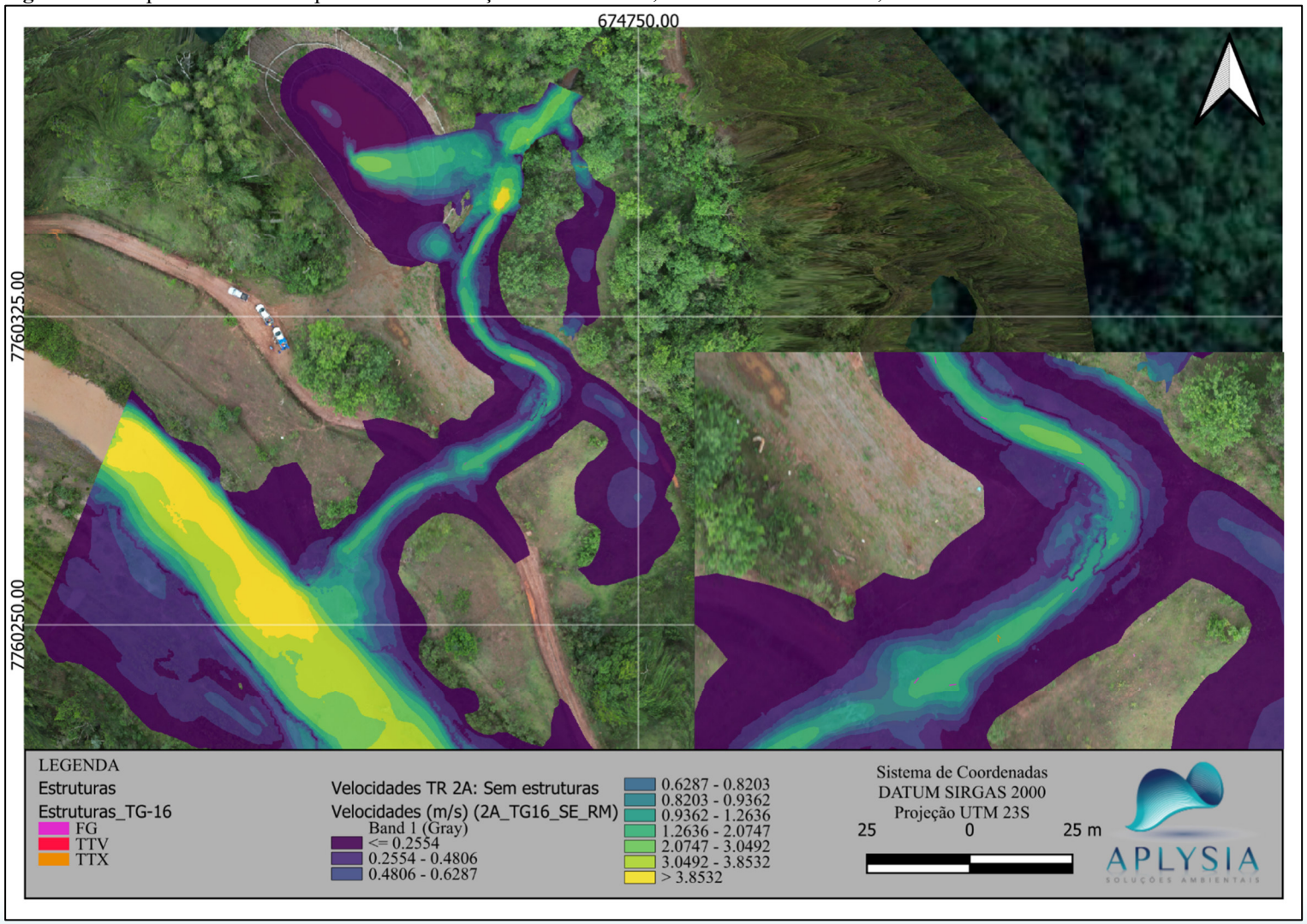
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 39 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas e TR = 2 anos.



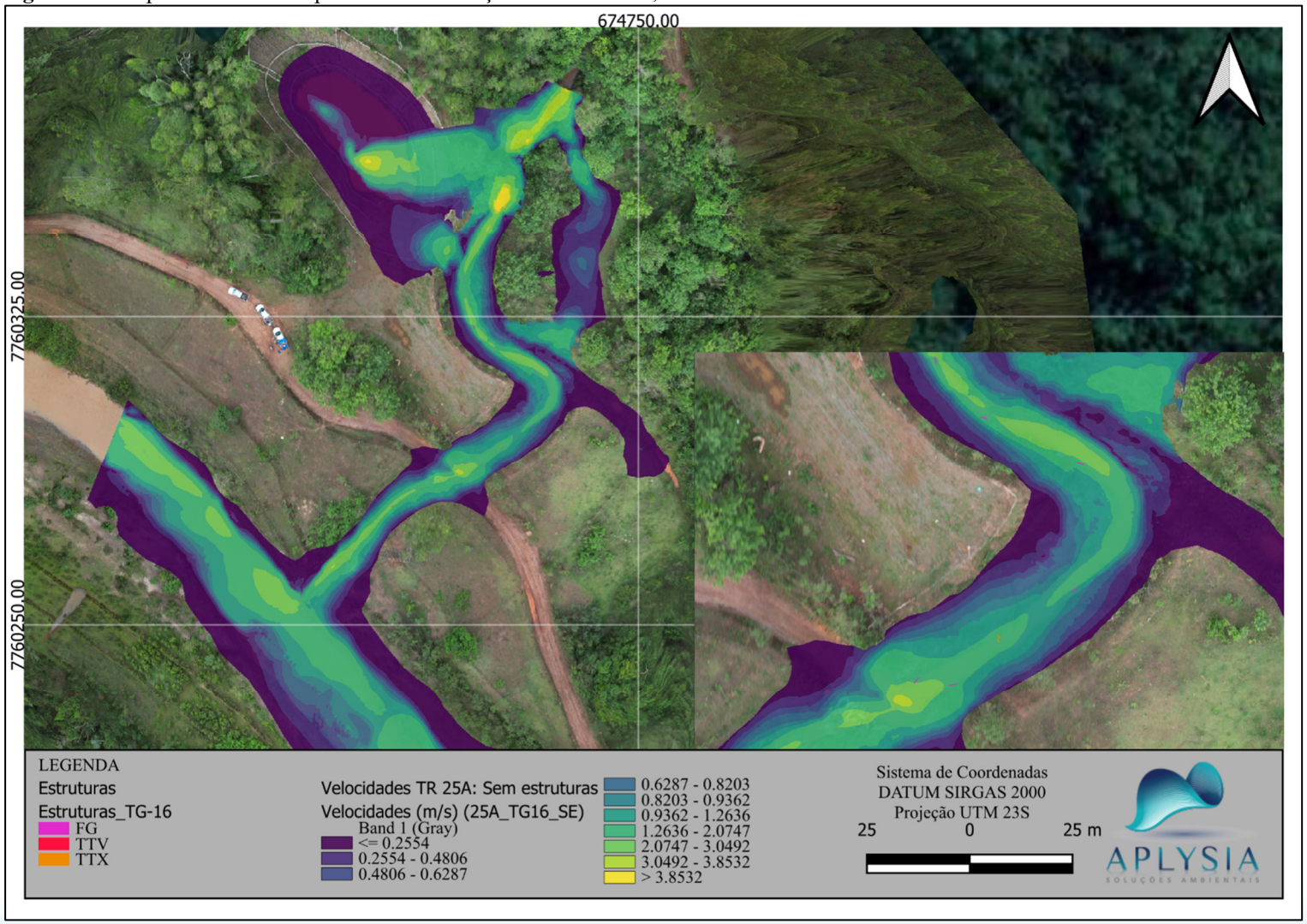
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 40 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



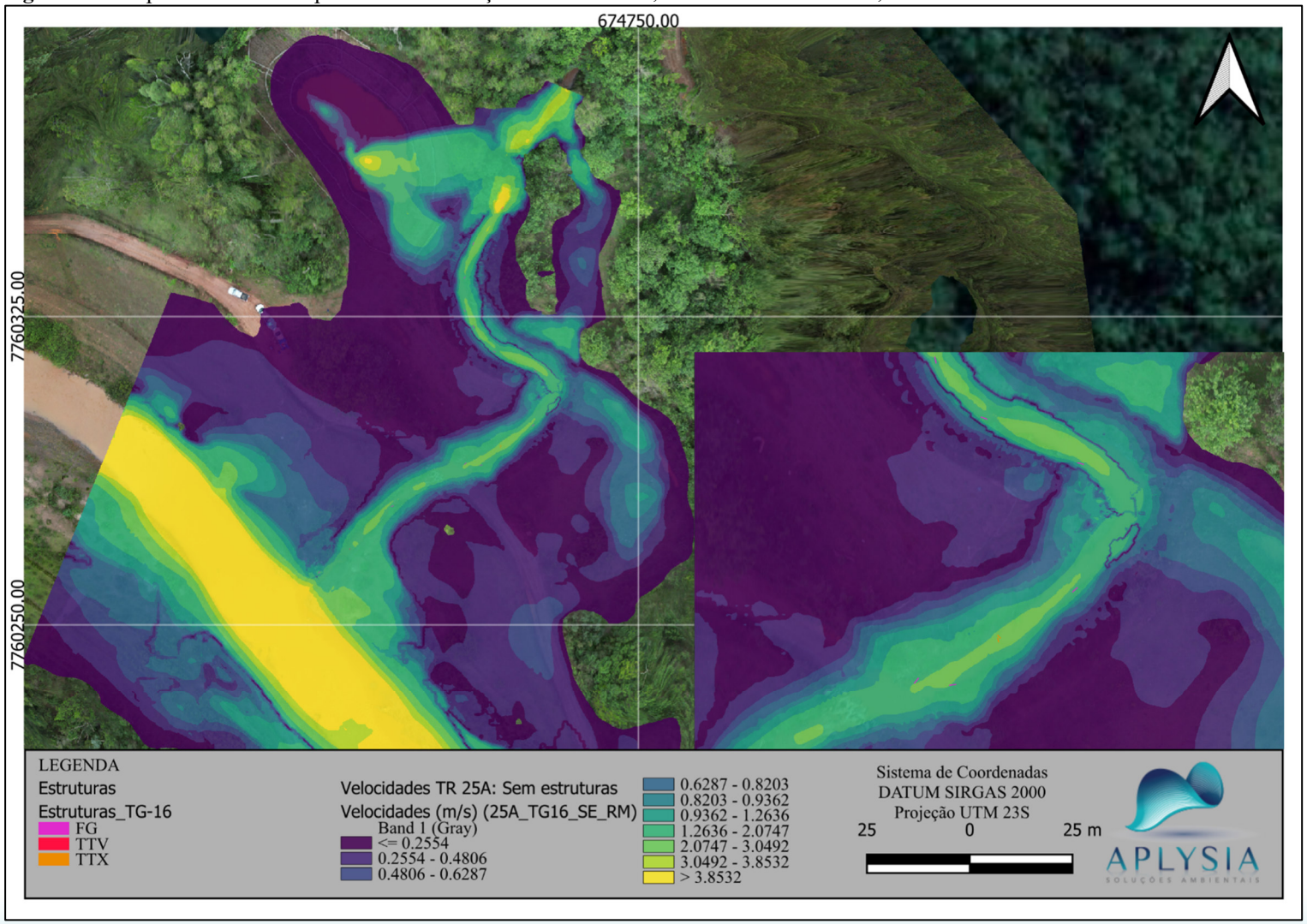
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 41 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



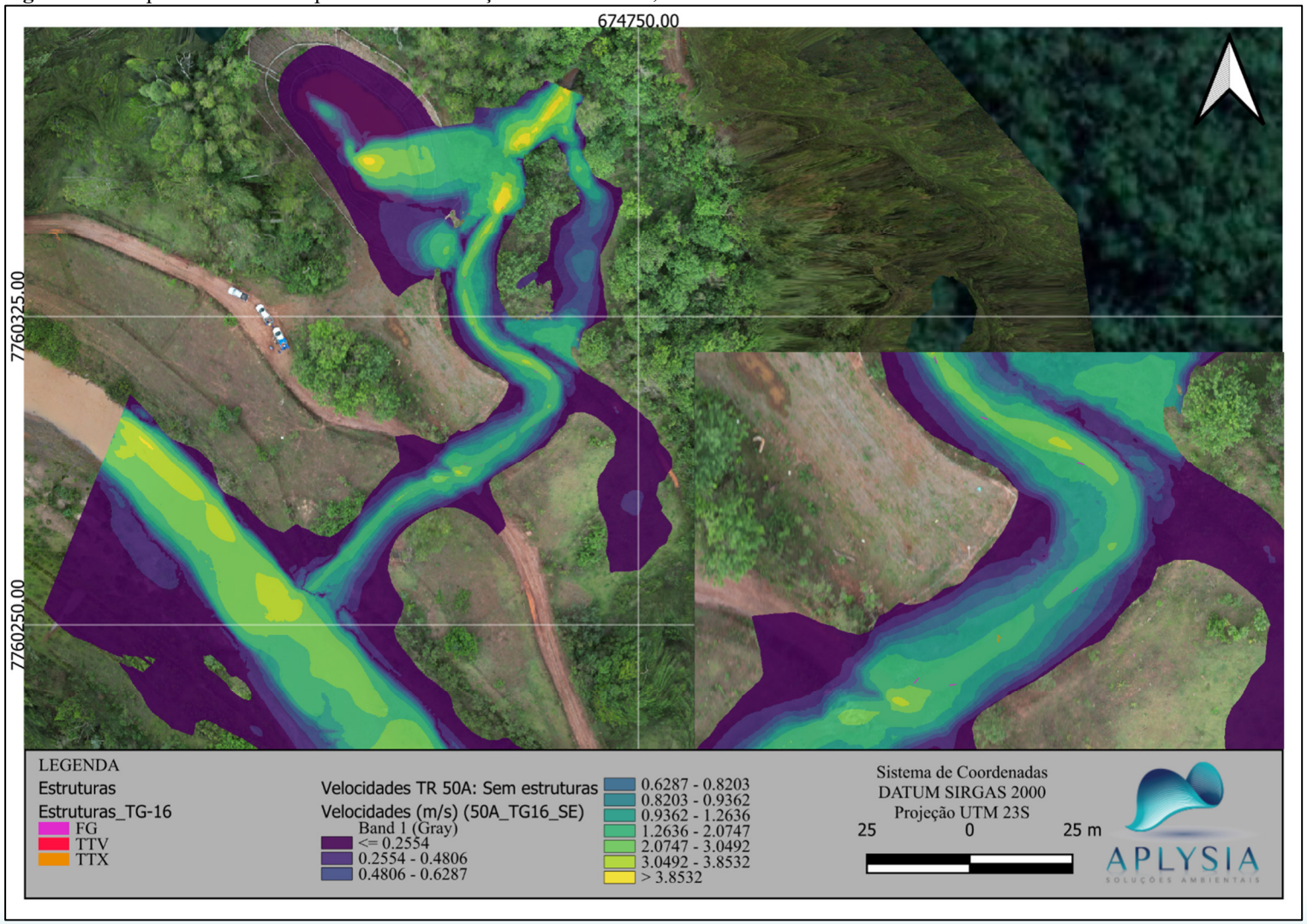
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 42 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



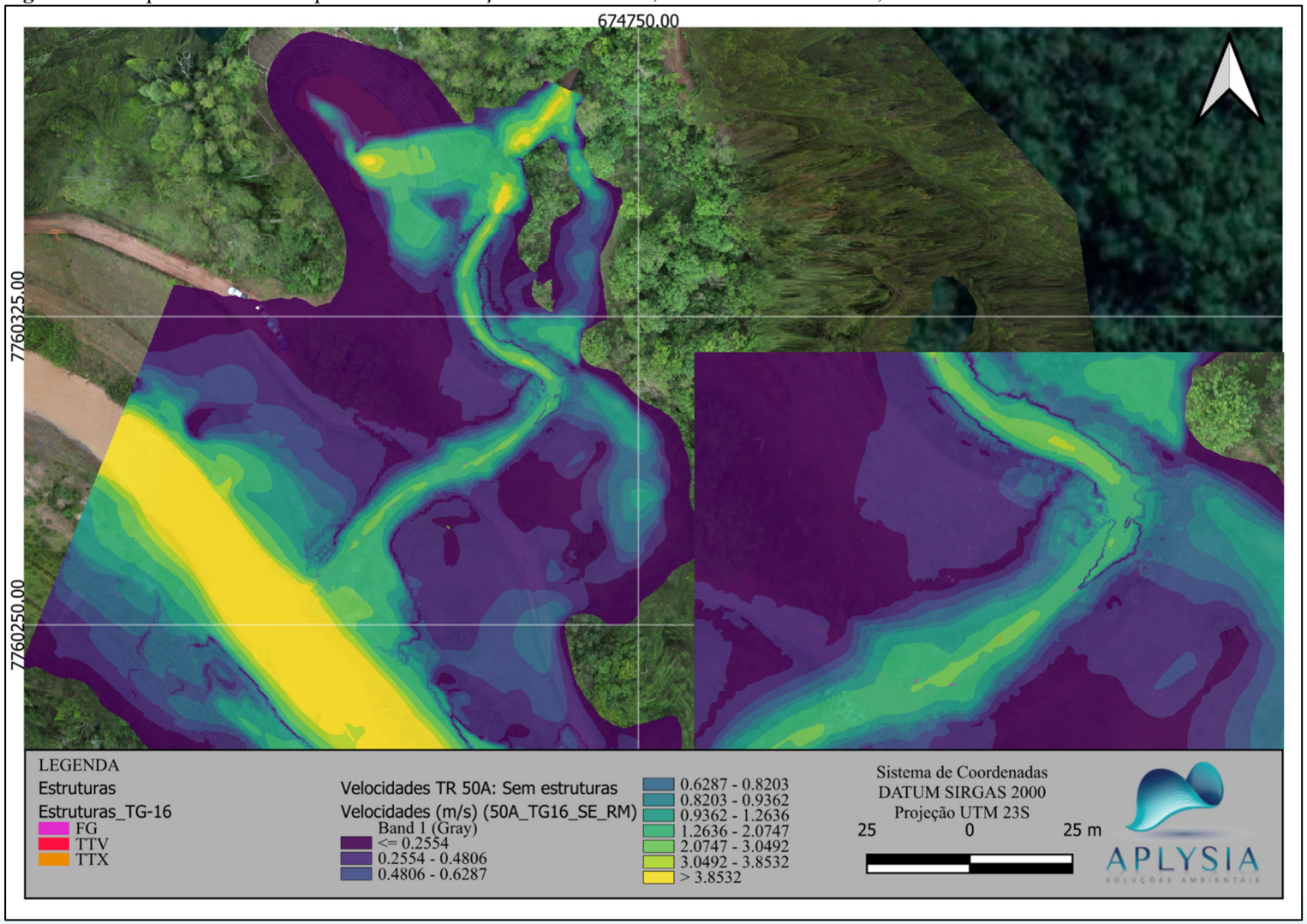
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 43 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



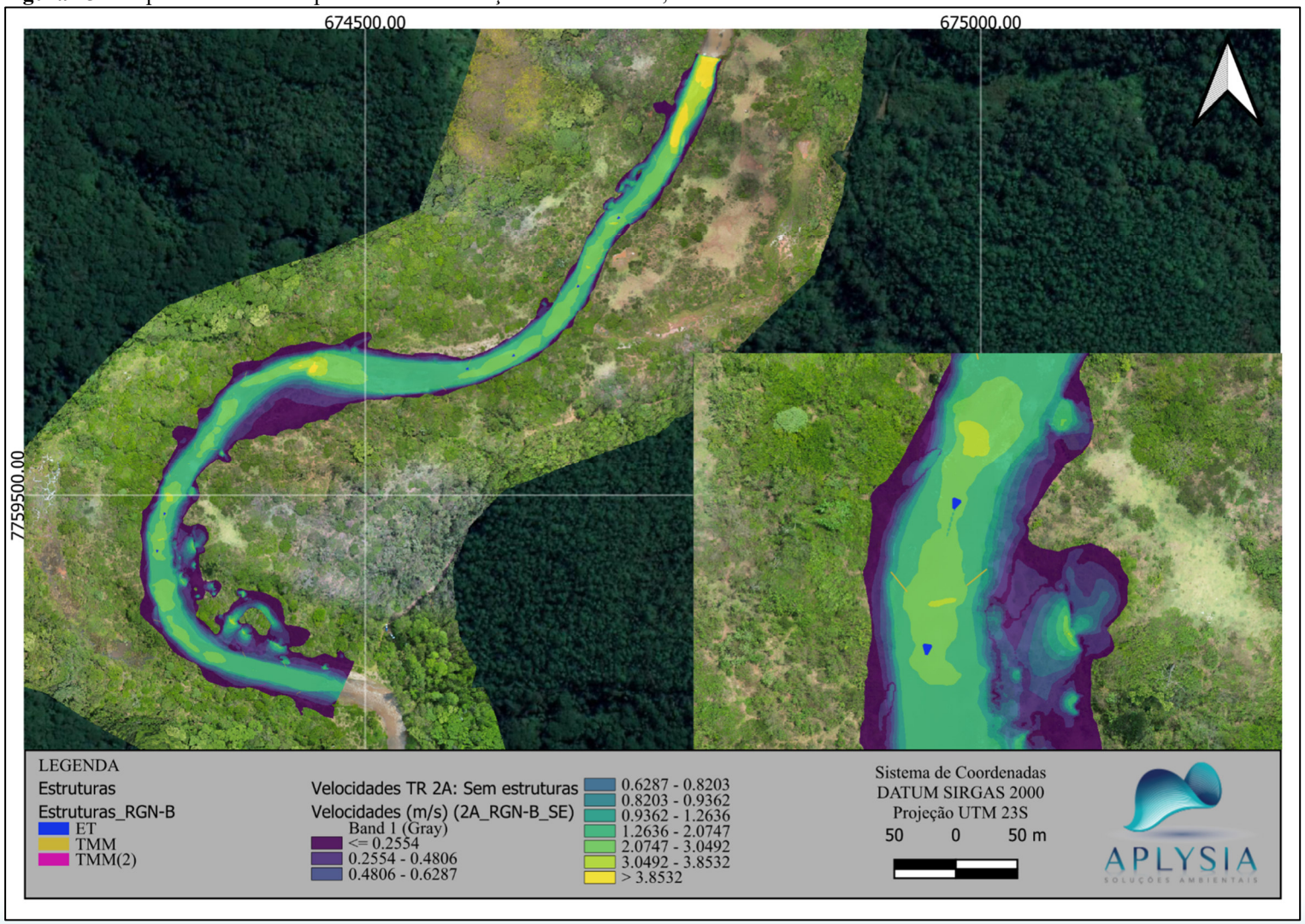
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 44 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



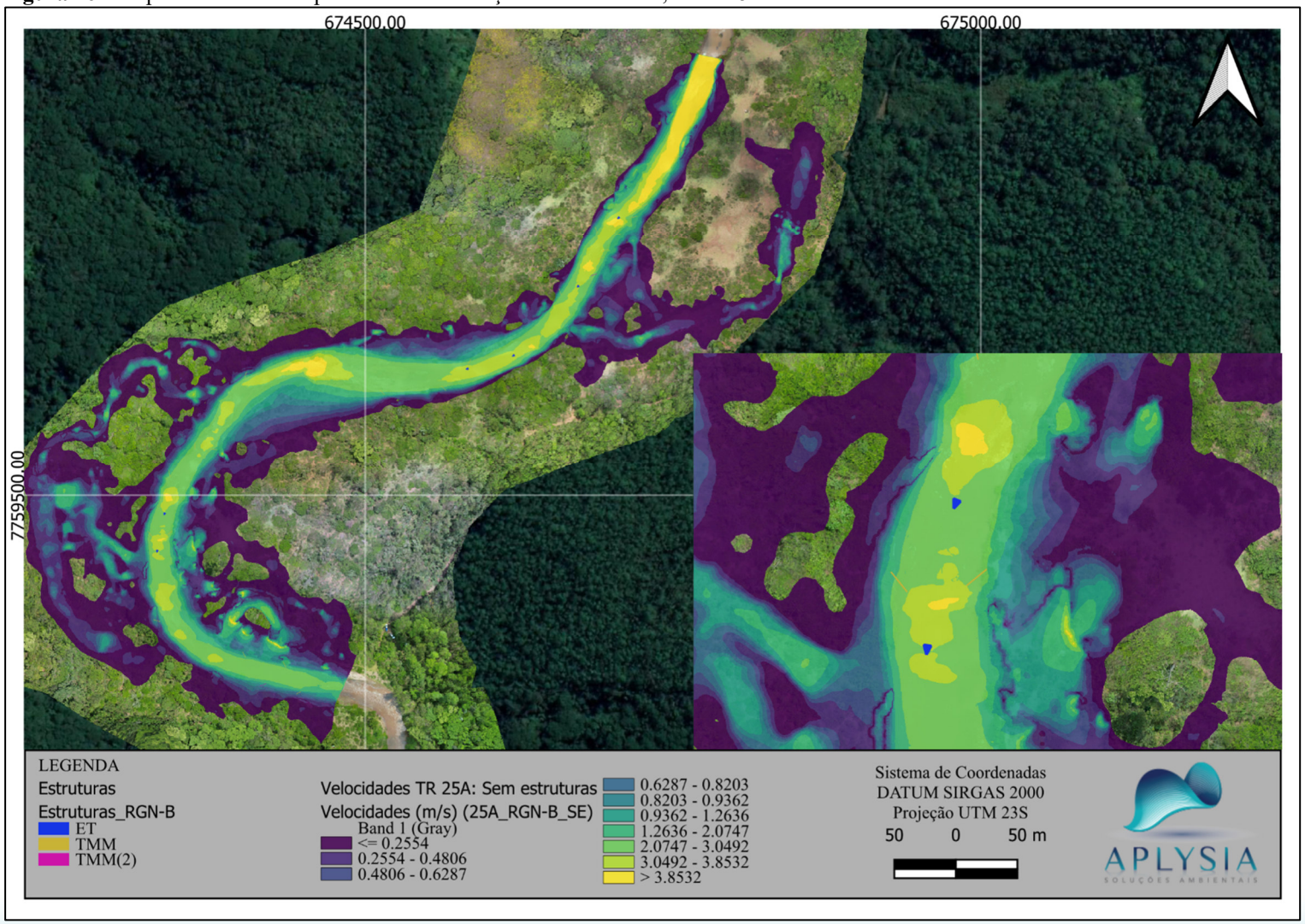
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 45 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



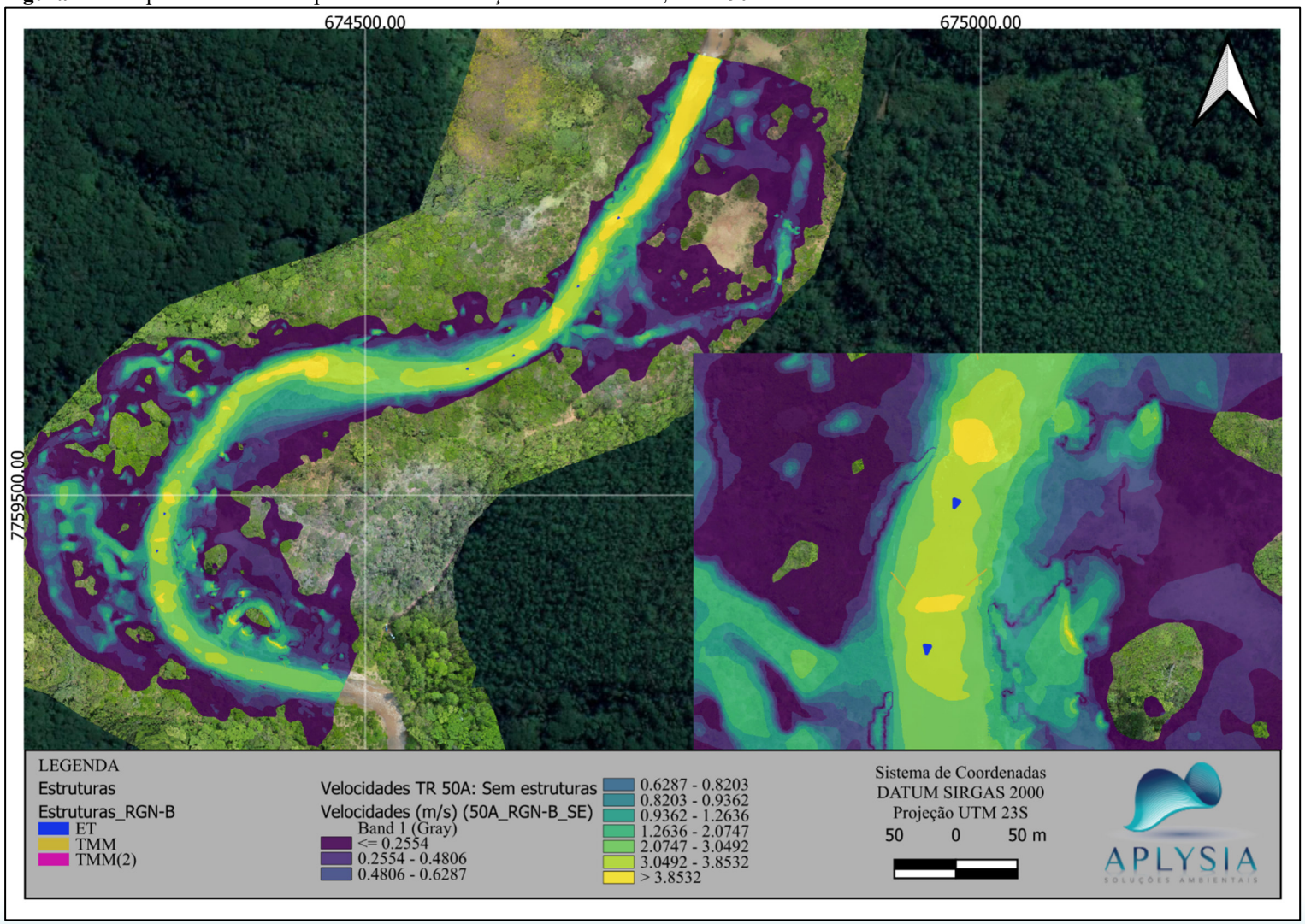
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 46 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



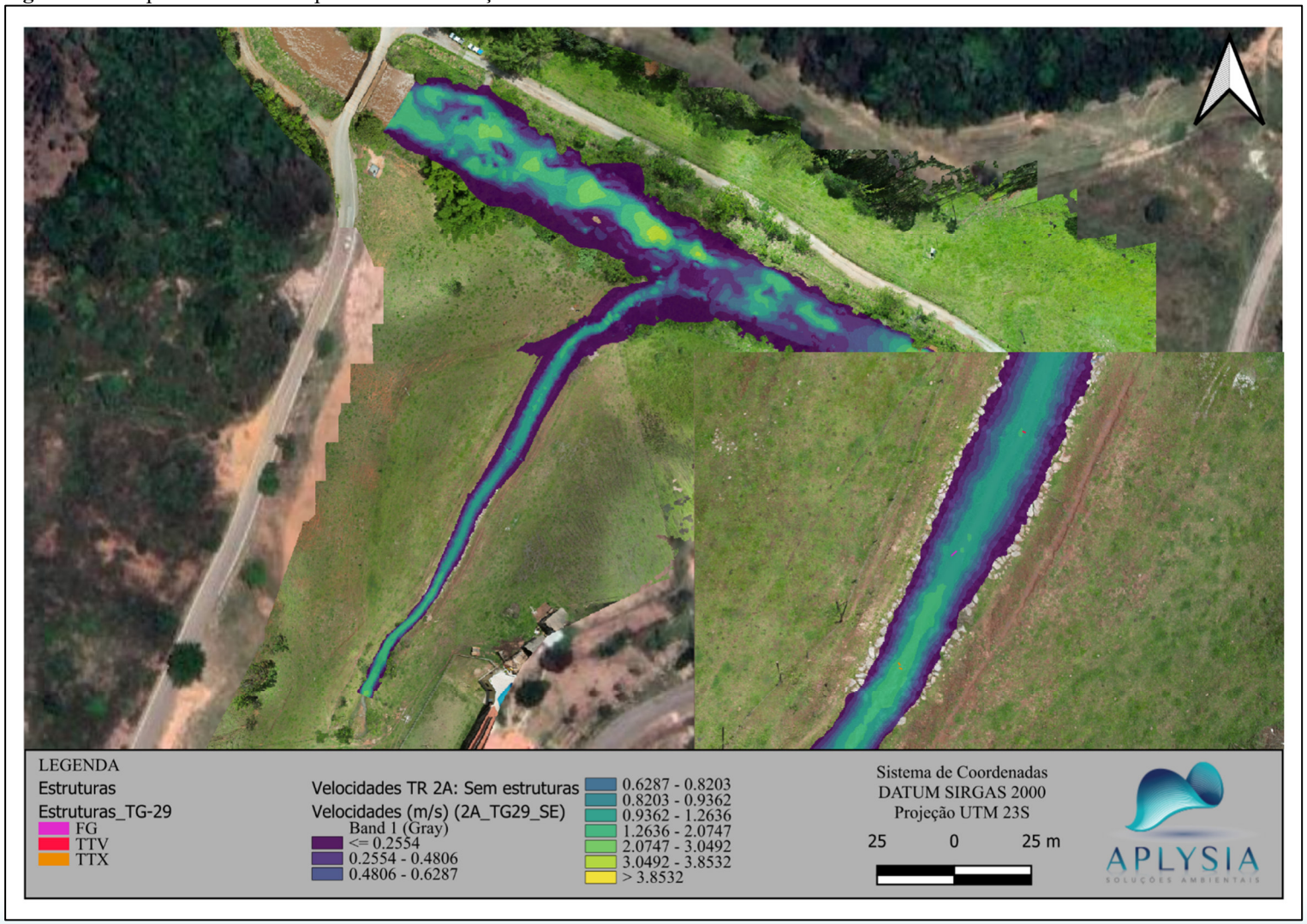
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 47 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



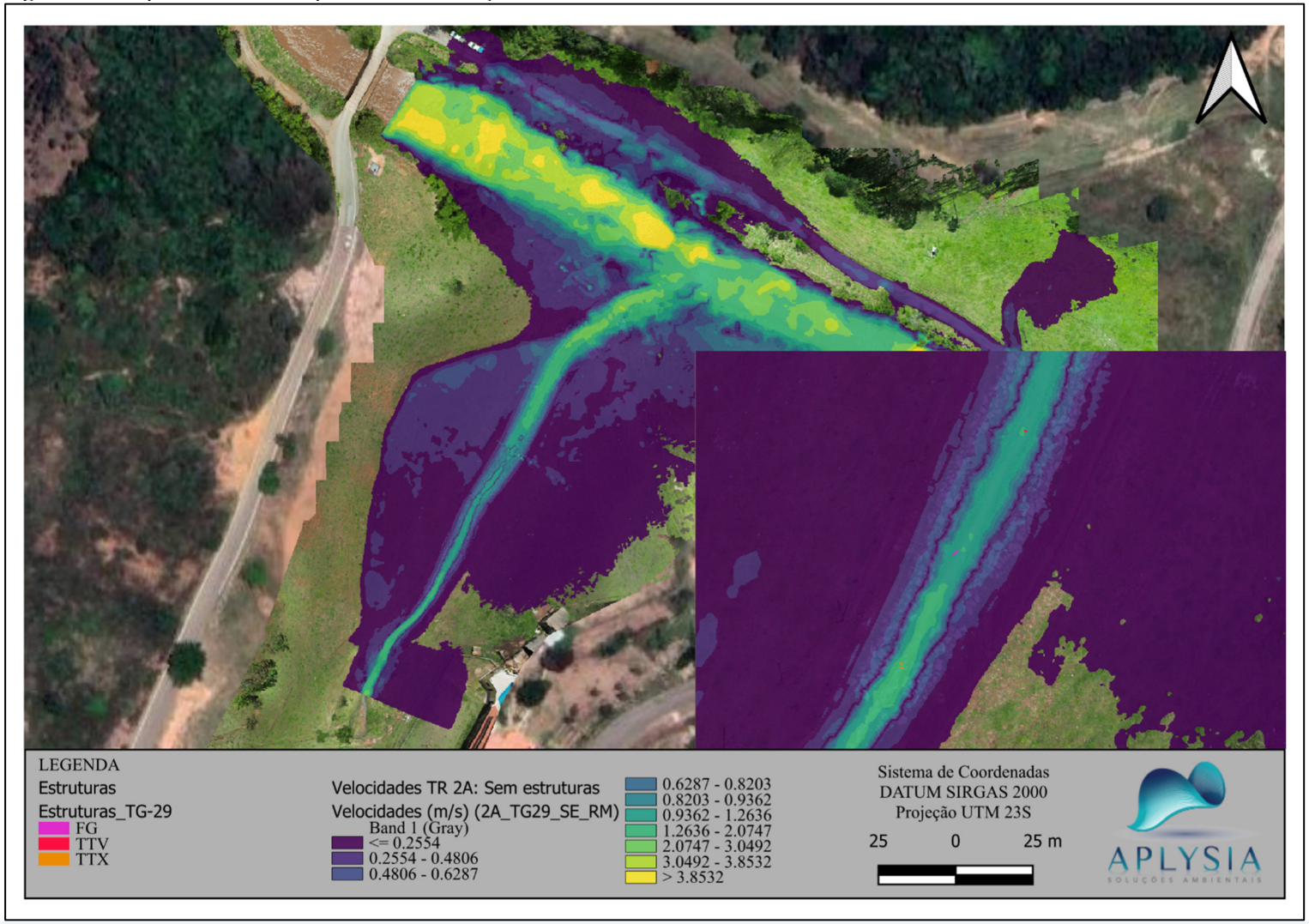
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 48 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas e TR = 2 anos.



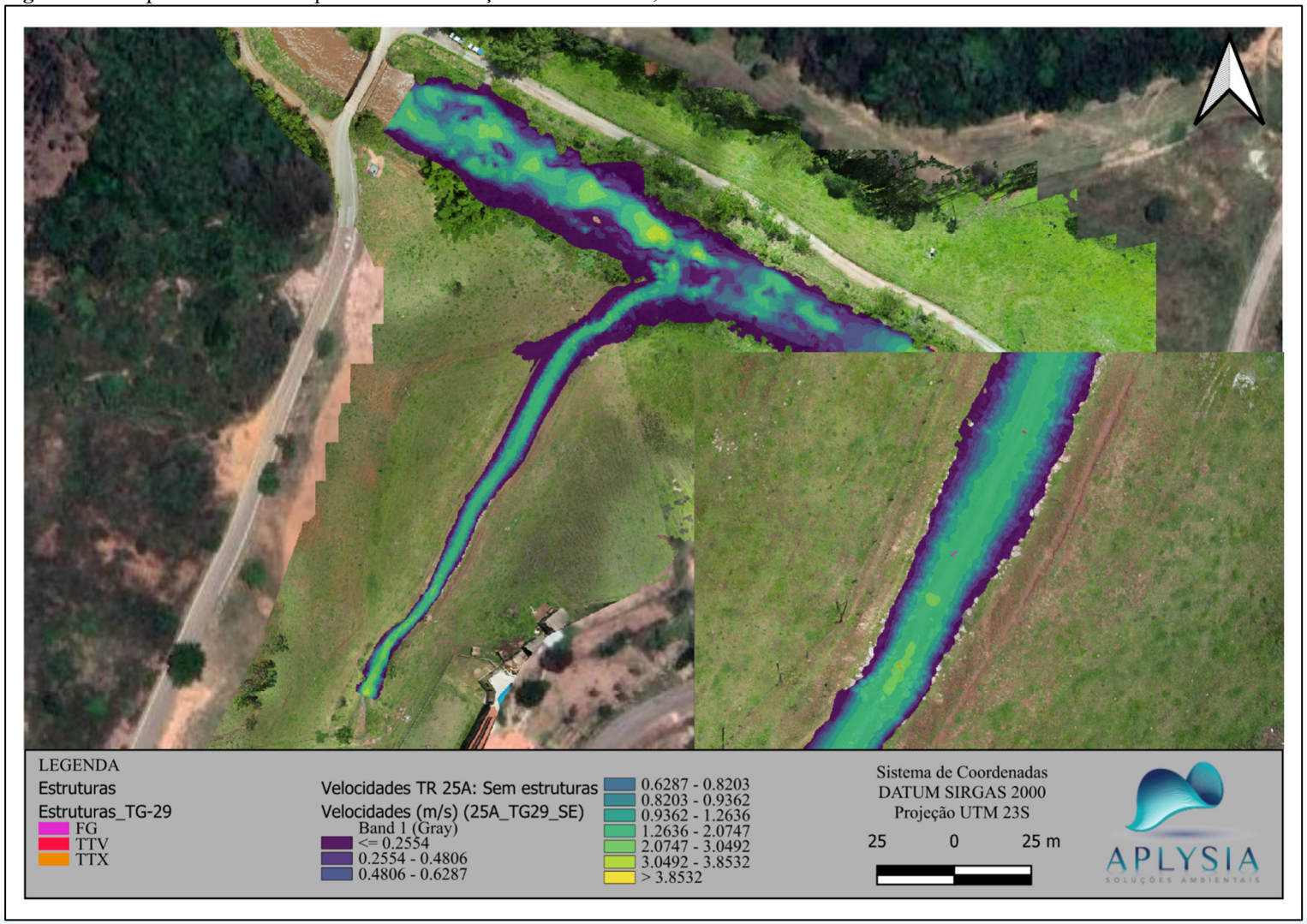
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 49 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



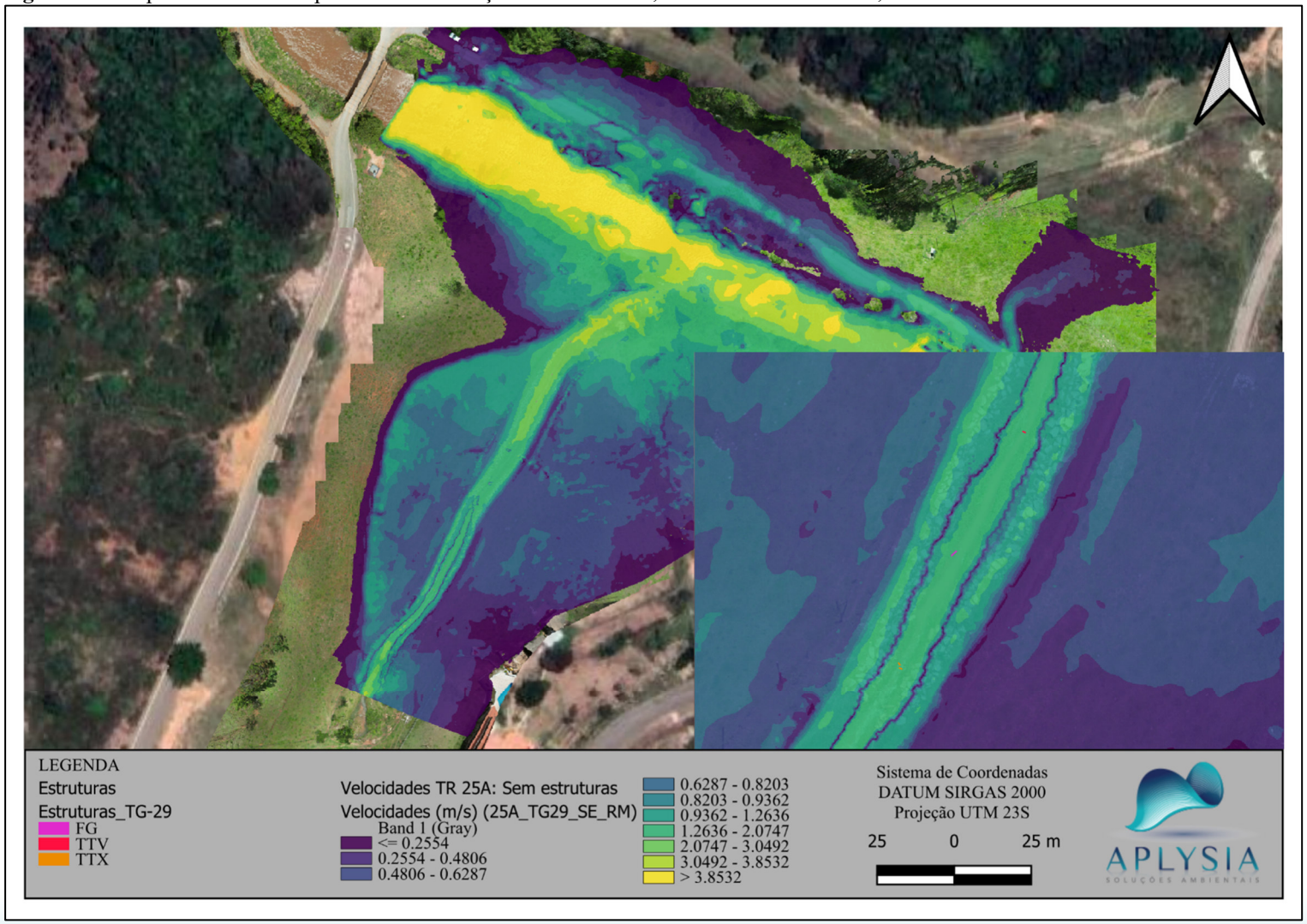
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 50 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



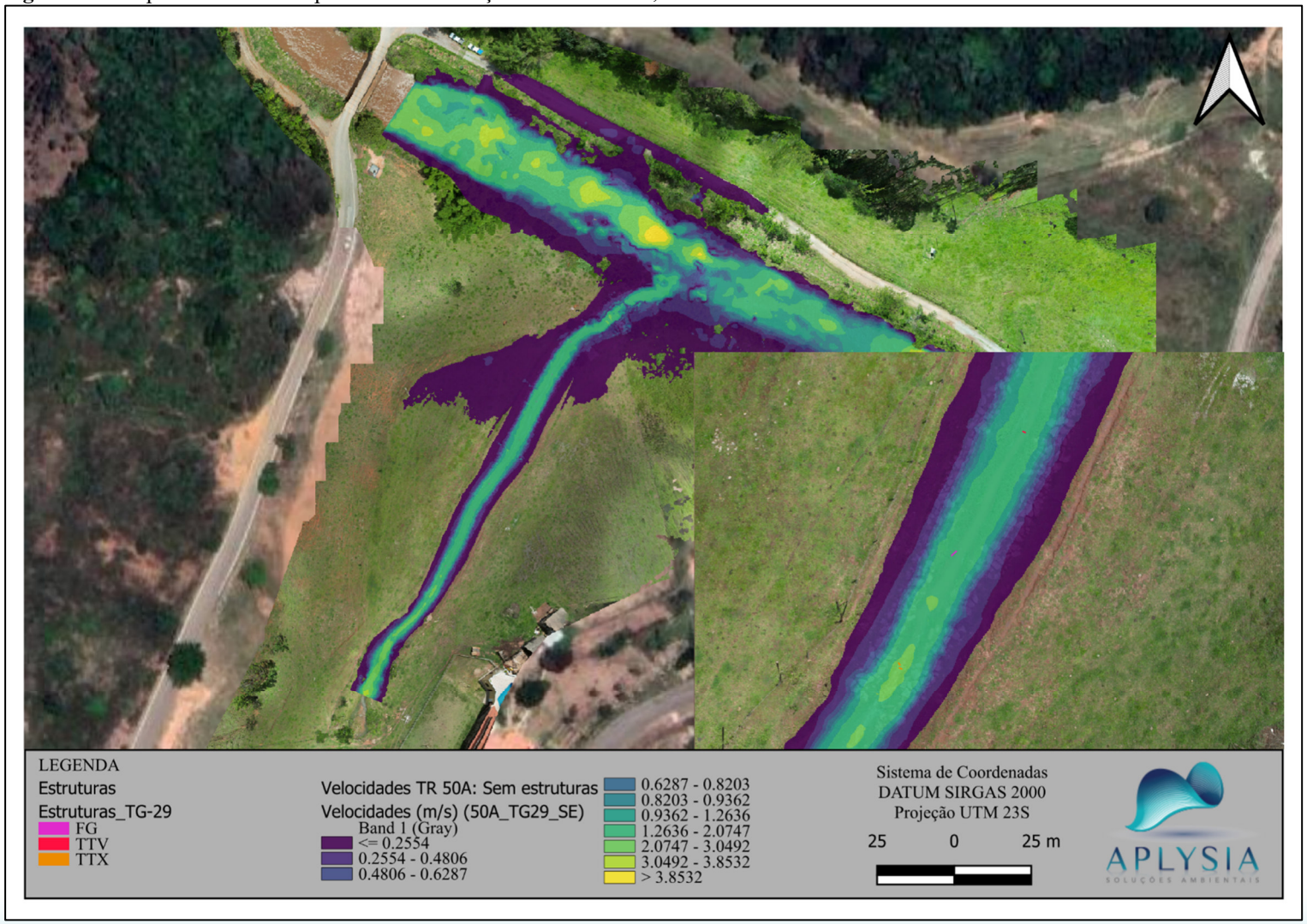
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 51 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



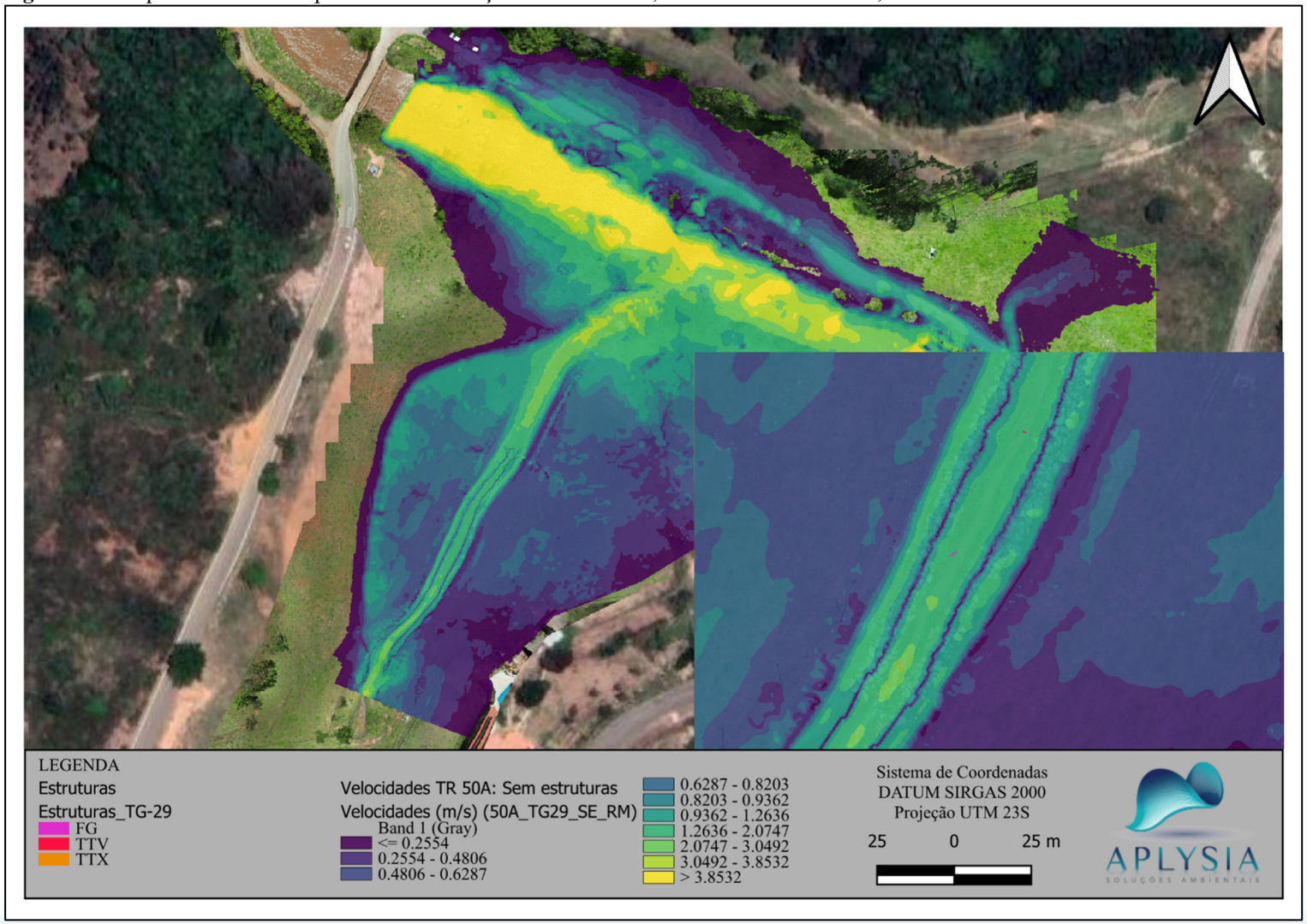
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 52 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



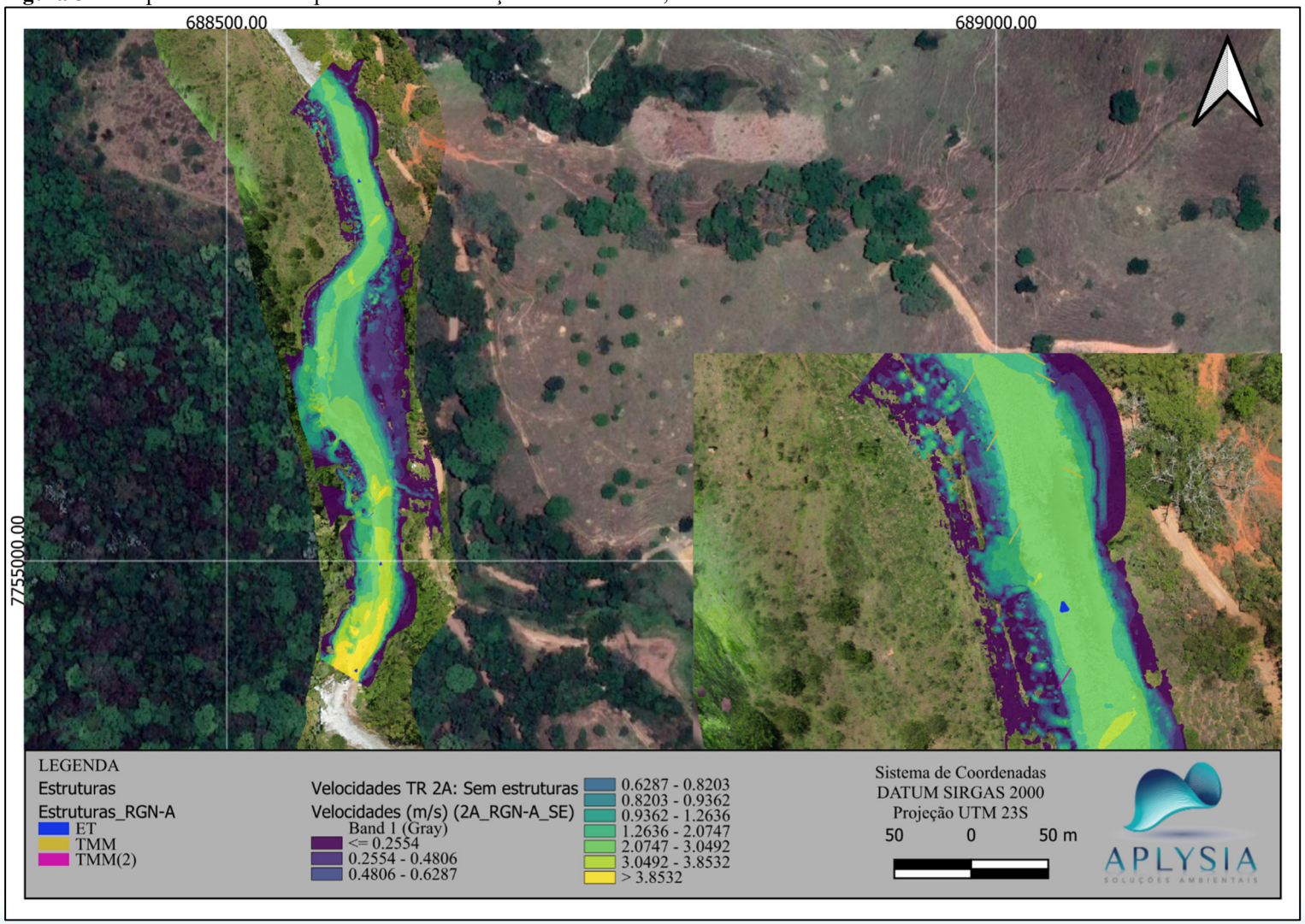
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 53 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



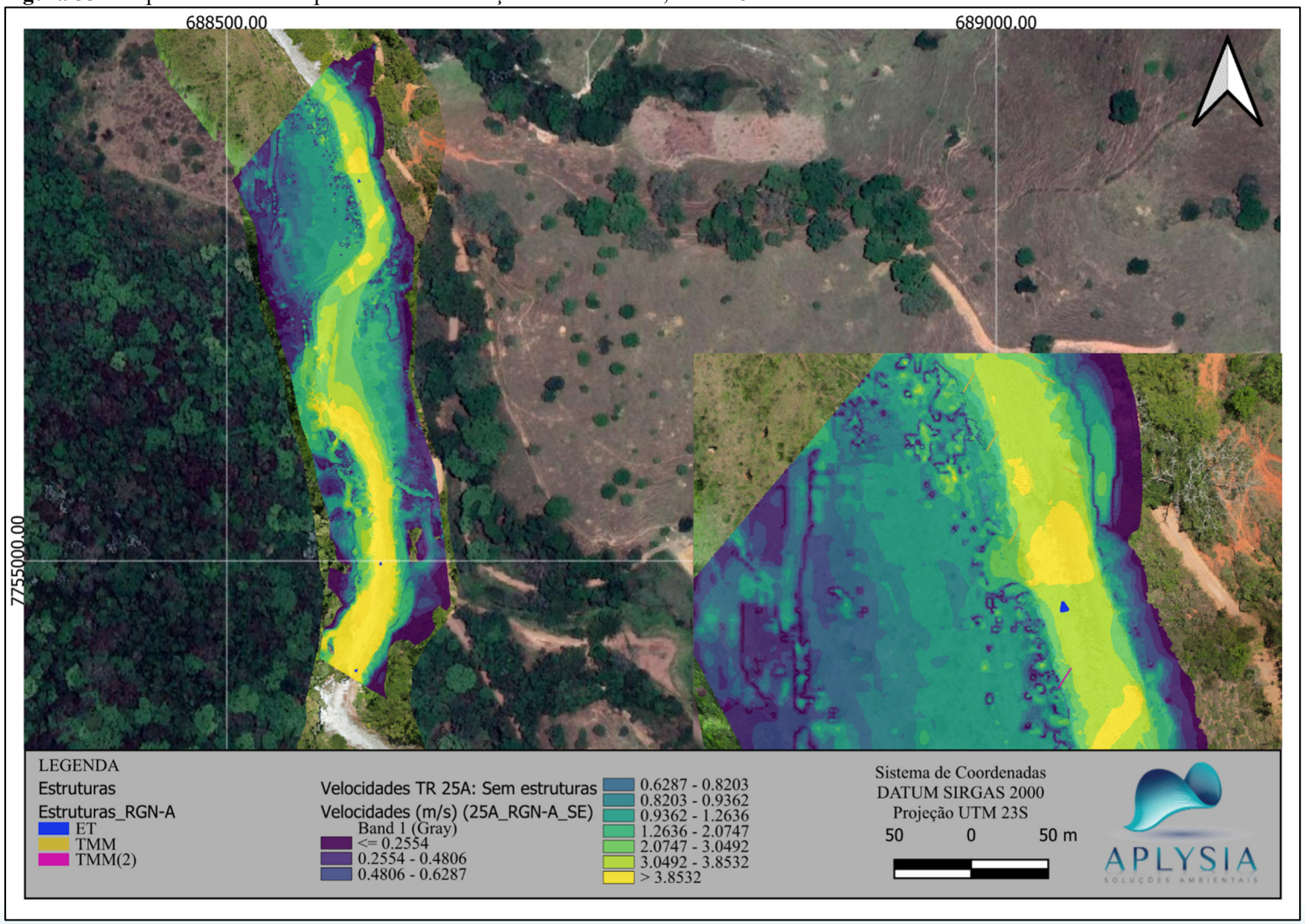
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 54 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



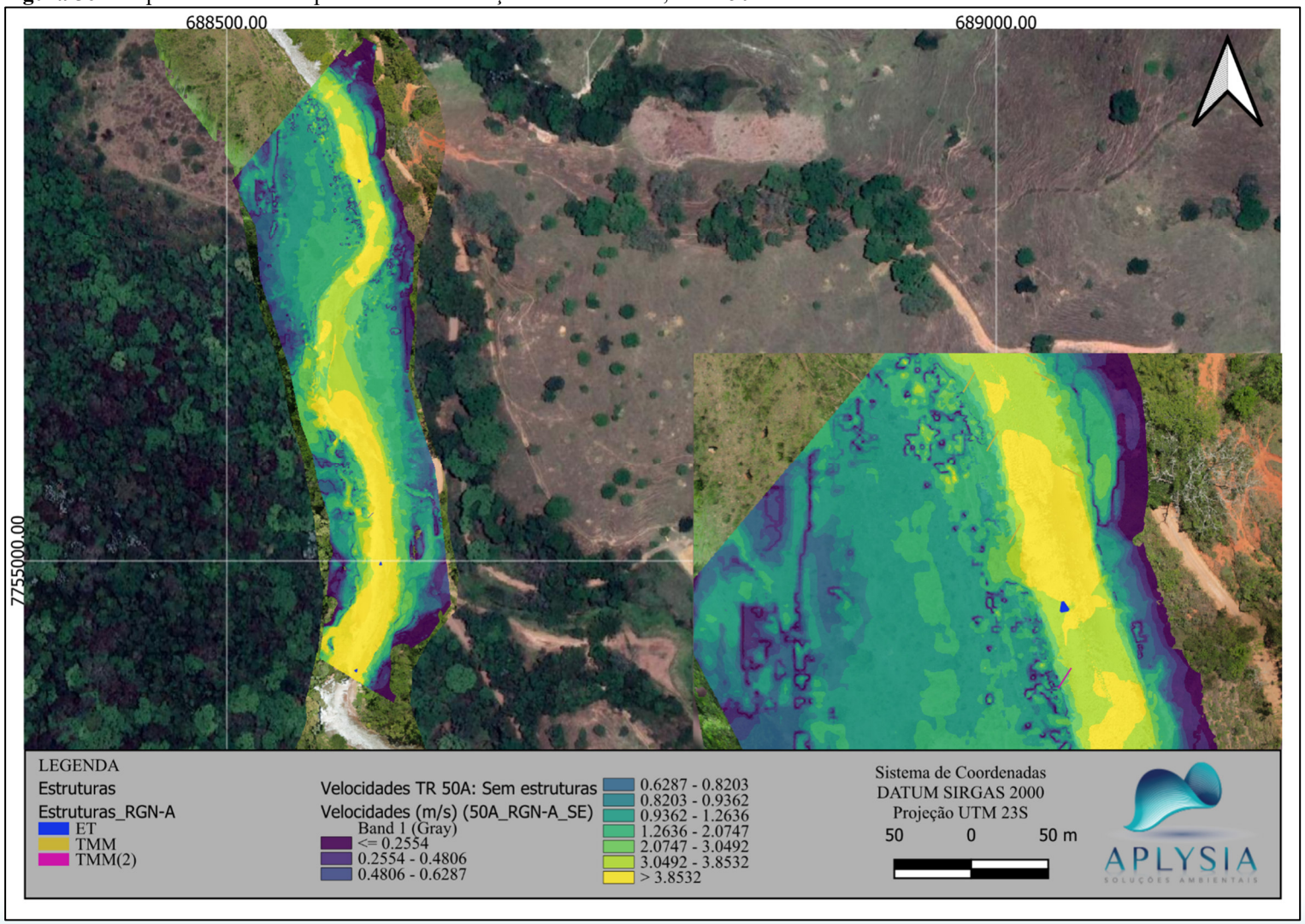
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 55 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 56 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 50 anos.

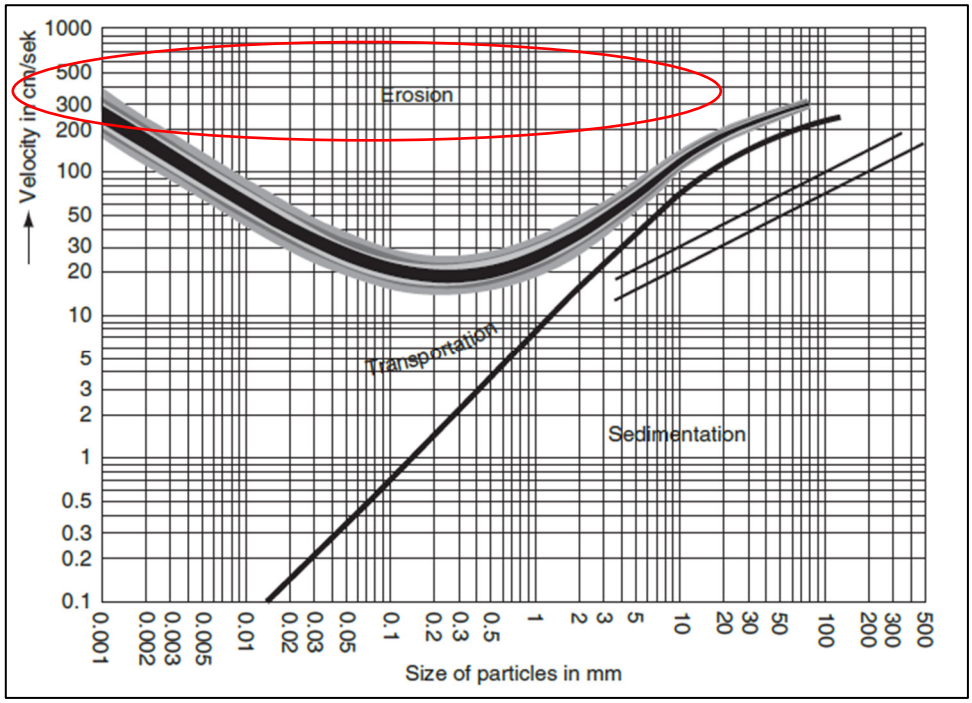


Fonte: Aplysia, 2024.

As estruturas ilustradas nos mapas acima não levam em conta as estruturas no MDT, isto é, servem apenas como indicativo para a melhor localização de pontos de interesse, sendo que os mapas com os resultados relacionados com as estruturas intrínsecas no MDT, são ilustrados no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024), assim como nos Anexos deste relatório. Para fins de interpretação dos resultados das simulações hidrodinâmicas, foram consideradas 2 etapas para verificação, sendo a primeira, chamada de "pontos de atenção", explorado no presente relatório e a seguinte com avaliação detalhada no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024).

Visando realizar uma análise dos impactos na condição natural da calha do RGN e seus tributários sob os eventos de TR 2, 25 e 50 anos, definiu-se como critério de atenção para levar a uma análise detalhada posterior, a curva de Hjulström (HJULSTROM, 1935) (Figura 57), um tipo especial de gráfico que mostra como a velocidade de um rio afeta sua calha e sua capacidade de erodir partículas de tamanhos diferentes.

Figura 57 – Reprodução do clássico gráfico log-log do tamanho do grão e velocidade do fluxo de Hjulstrom (1935)



Fonte: Hjulstrom (1935).

O presente gráfico foi considerado no relatório como referência, sendo que representa situações com 1 metro de profundidade e características específicas de sedimento, não se tratando de situações idênticas nos cenários simulados. Entretanto, a referência se torna válida pois permite adotar premissas para identificar pontos de atenção para avaliar a estabilidade das estruturas no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024), com uso do presente detalhamento realizado por meio da modelagem. Isso ocorre devido ao potencial desencadeamento de processos erosivos, a partir de um limiar adotado (destaque circulado em vermelho no gráfico para superação de 300-400 cm/s onde ocorre para qualquer material o desencadeamento de processos erosivos). Deste modo, as duas faixas finais das classes representadas nos mapas de velocidades, indicando condições a partir de, aproximadamente, 3 m/s (cor verde-limão), para os tributários, e 4 m/s (cor amarela) para o RGN, foram tomadas como pontos de atenção.

Em seguida, para uma avaliação mais objetiva das velocidades nesses pontos de atenção, tanto na condição sem estruturas (Figuras 23 a 52) como da condição com estruturas (Anexo), optou-se por apresentar neste documento uma avaliação detalhada dos trechos (Tabela 4) por meio das velocidades incrementais mais impactantes em relação as estruturas avaliadas (Figuras 58 a 62), identificando assim os pontos de alerta. Assim, podem ser verificadas as variações de velocidade em diferentes faixas e avaliar tais situações no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024). Os demais mapas de velocidades incrementais podem ser encontrados em Anexo.

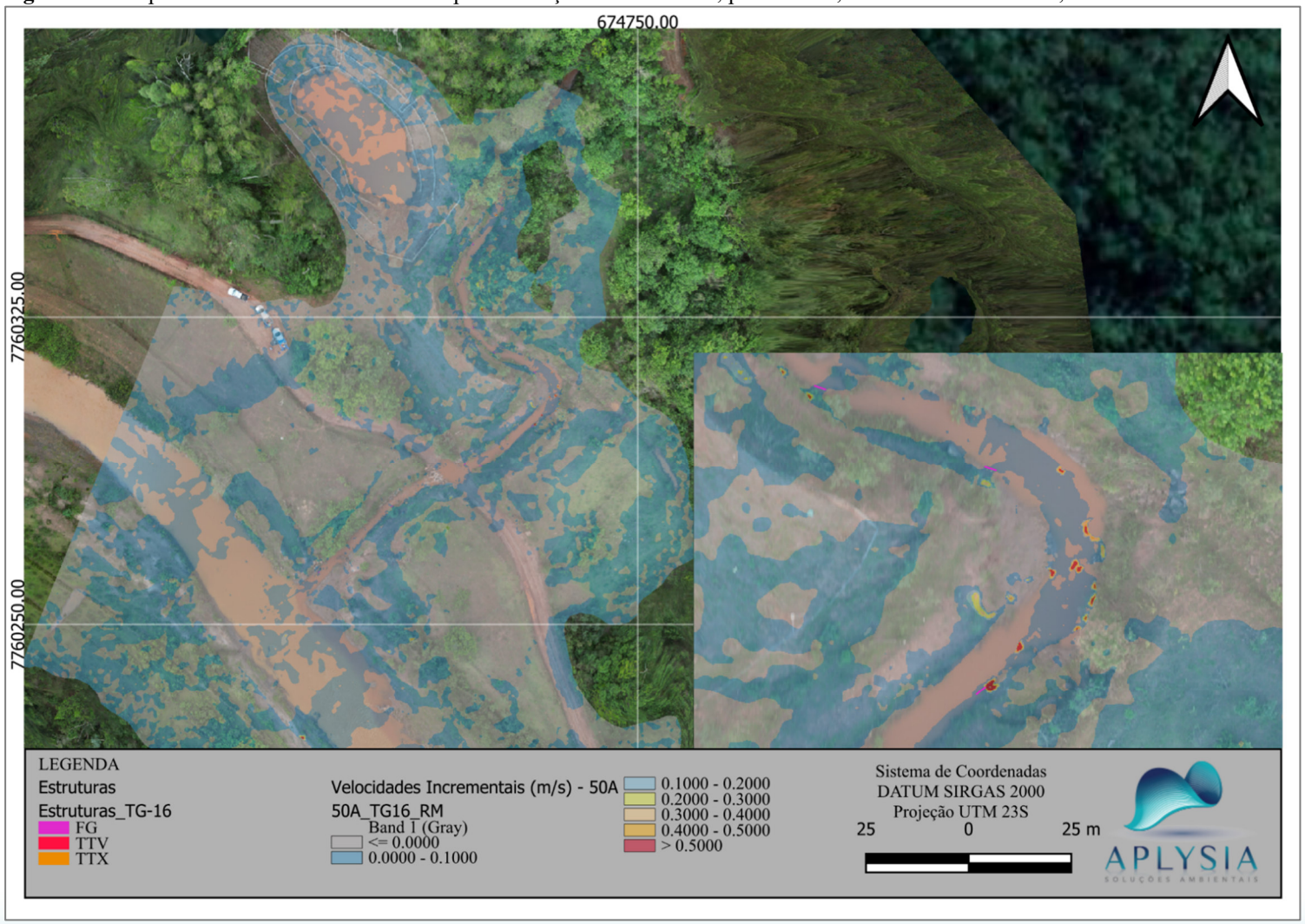
Tabela 4 – Avaliação das estruturas situadas em local com velocidade crítica ou com potencial erosivo para todos os trechos e TR's avaliados.

Trechos avaliados	TR avaliado	Estruturas inseridas em local com Velocidade Crítica: Ponto de Atenção (cenários de calha natural, v >3m/s ou >4m/s)	Estruturas com Potencial Erosivo: Ponto de Alerta (cenários pós instalação, dV > 10%)
TG11	TR 2A	-	E16 (TTX)
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	E01, E16 (TTX)
TG11_RM	TR 2A	-	E03 (FG) E16 (TTX)
	TR 25A	-	E03 (FG) E01, E16 (TTX)
	TR 50A	-	-

Tabela 4 – Avaliação das estruturas situadas em local com velocidade crítica ou com potencial erosivo para todos os trechos e TR's avaliados, continuação.

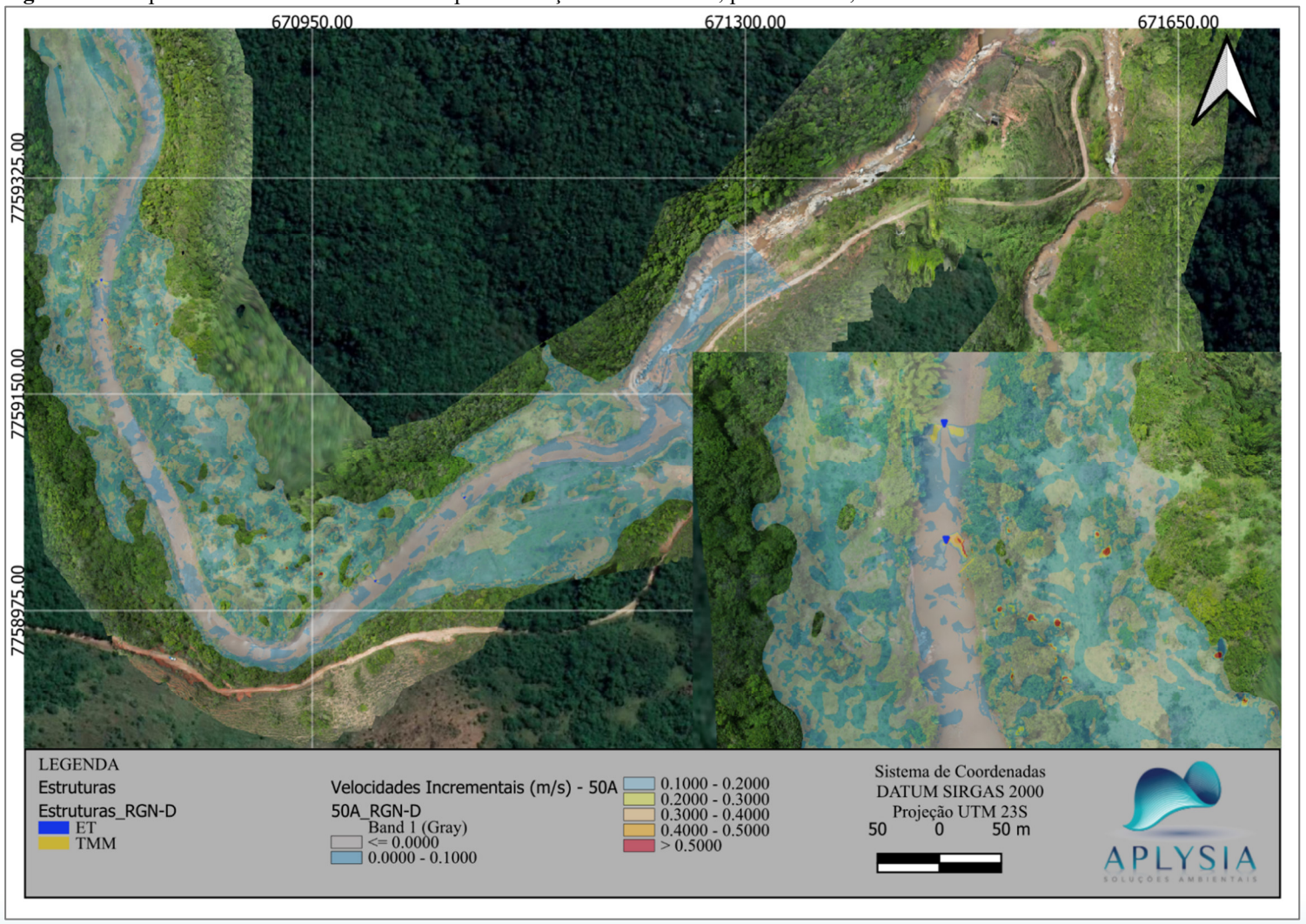
Trechos avaliados	TR avaliado	Estruturas inseridas em local com Velocidade Crítica: Ponto de Atenção (cenários de calha natural, v >3m/s ou >4m/s)	Estruturas com Potencial Erosivo: Ponto de Alerta (cenários pós instalação, dV > 10%)
RGN-D	TR 2A	E03 (TMM) E02 (ET)	E03-E04, E17 (TMM) E01, E02, E16 e E24 (ET)
	TR 25A	E03-E04, E06 (TMM) E02 (ET)	E03-E04, E08, E11, E13, E22-E23 (TMM) E02, E16 e E24 (ET)
	TR 50A	E03-E06 (TMM) E01-E02 (ET)	E03-E04, E08, E11, E13, E22-E23 (TMM) E02, E16 e E24 (ET)
RGN-C	TR 2A	E02 (TMM) E08 (ET)	E02 e E31(TMM) E06, E08, E23, E30, E34 (ET)
	TR 25A	E02-E05, E07, E18, E20 (TMM) E01, E06, E08 e E19 (ET)	E03, E09, E11-E13, E20, E31-E32 (TMM) E01, E06, E08, E23, E30, E34 (ET)
	TR 50A	E02-E05, E07, E18, E20 (TMM) E01, E06, E08 e E19 (ET)	E03, E12, E20, E31 (TMM) E01, E06, E08, E23, E30, E34 (ET)
TG16	TR 2A	-	E01 (FG)
	TR 25A	E01-E02, E10, E14 (FG)	E01 (FG)
	TR 50A	E01-E02, E04-E05, E07, E10 (FG)	E08 (FG)
TG16_RM	TR 2A	-	E01 (FG)
	TR 25A	E01-E02 (FG)	E06-E07 (FG)
	TR 50A	E01-E02, E04-E05, E07 (FG)	E06-E08 (FG)
RGN-B	TR 2A	E18 (TMM)	E19, E24 (TMM) E05, E15, E26 (ET)
	TR 25A	E06-E10 e E18 (TMM) E05, E11 e E23 (ET)	E19, E24 (TMM) E05, E11, E13, E15, E23, E26 (ET)
	TR 50A	E01-E12, E18-E19 e E24-25 (TMM) E05, E11, E13, E23 e E26 (ET)	E19, E20, E29 (TMM) E05, E11, E15, E26 (ET)
TG29	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	E12 (FG)
T29_RM	TR 2A	E12 (FG)	E07 (FG) E08 (TTV)
	TR 25A	E11-E12 (FG)	E07 (FG)
	TR 50A	E10-E12 (FG)	E07 (FG)
RGN-A	TR 2A	-	E04-E08, E10-E11, E13-14, E16-E17 (TMM) E01, E03, E12 (ET)
	TR 25A	E02-E14 (TMM) E01, E03, E12 (ET)	E05-E11, E13, E18 (TMM) E01, E03, E12 (ET)
	TR 50A	E02-E18 (TMM) E01, E03, E12 (ET)	E05-E11, E13, E18 (TMM) E01, E03, E12 (ET)

Figura 58 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; com efeito de remanso; TR = 50 anos.



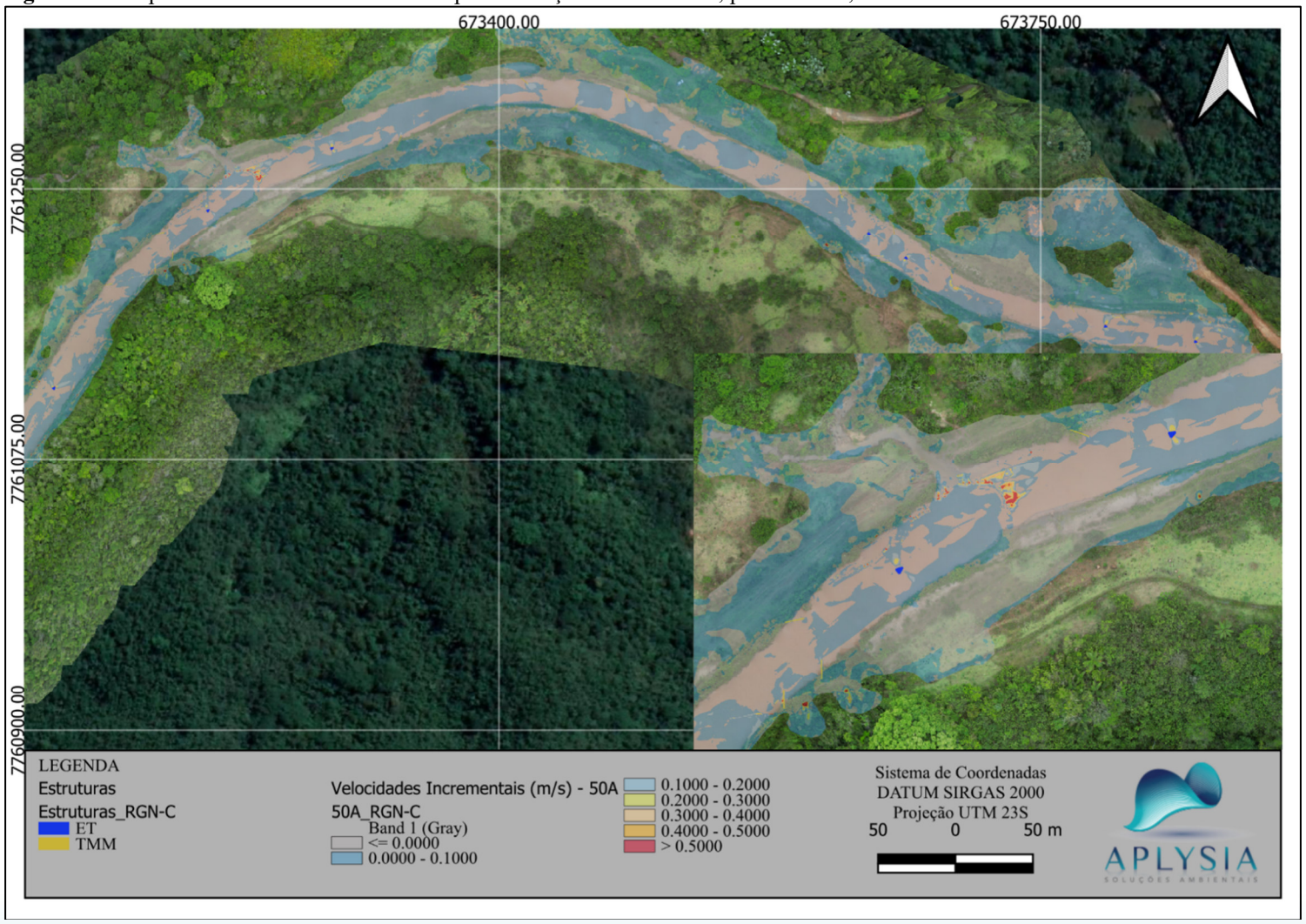
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 59 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-D; TR = 50 anos.



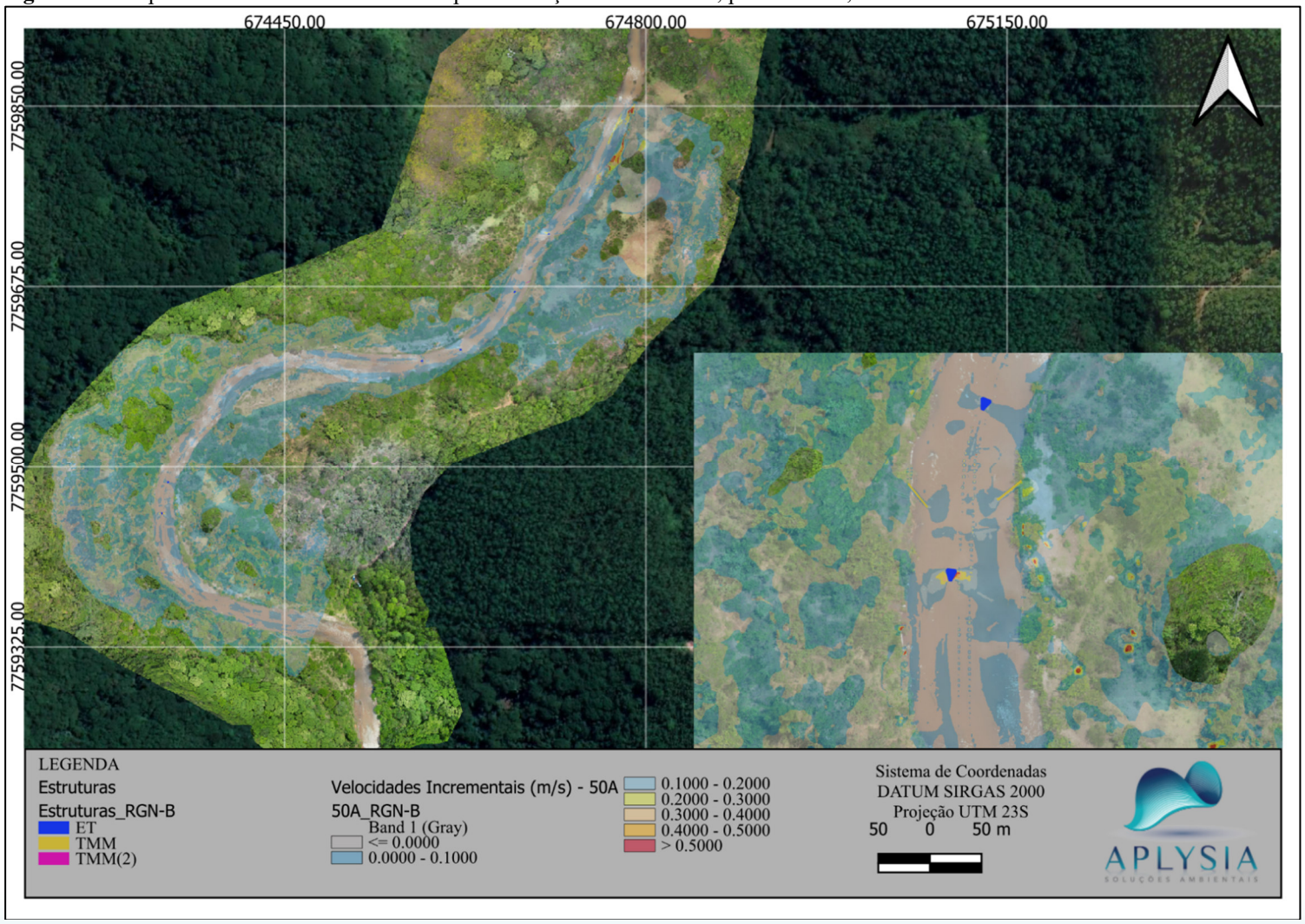
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 60 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-C; TR = 50 anos.



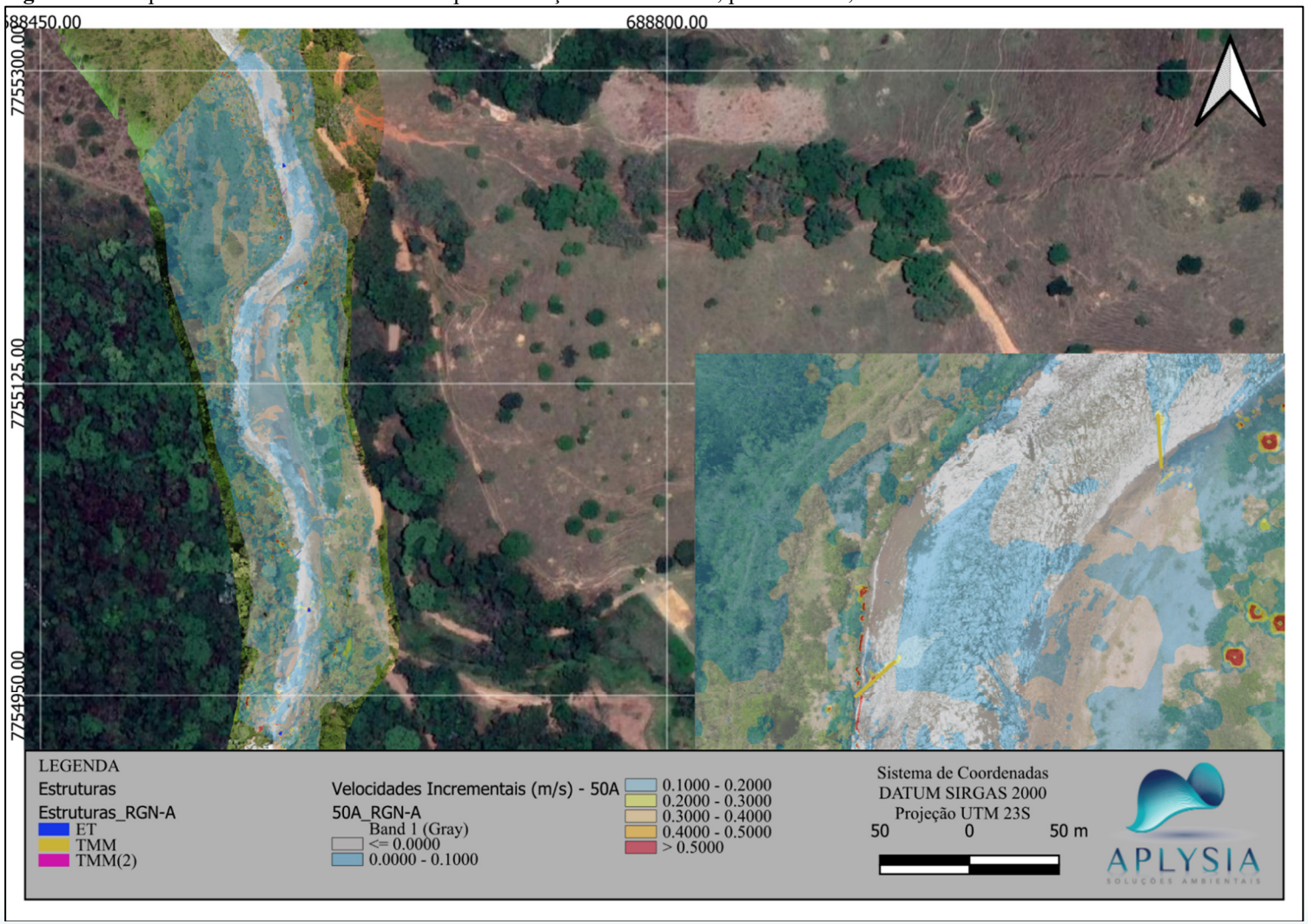
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 61 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-B; TR = 50 anos.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 62 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-A; TR = 50 anos.



Fonte: Aplysia, 2024.

Adiante, após avaliação de todos os pontos de atenção relacionados a velocidade crítica da calha do RGN e tributários (destacados nos mapas acima), assim como todos os pontos de alerta relacionados a velocidades incrementais superiores a 10% em relação a velocidade natural, ocasionadas pelas estruturas, verificou-se as estruturas que apresentaram ambos os pontos de atenção e alerta, de forma cumulativa. Deste modo, o objetivo do presente documento é identificar tais pontos para serem solucionados no Relatório de Estabilidade das Estruturas (APLYSIA, 2024), a ser verificado concomitante com este. Portanto, foram definidas as estruturas posicionadas com maior risco de instabilidade ao acumular:

- Localização com velocidade crítica na calha;
- Maior potencial erosivo devido a velocidade incremental significativa.

Por fim, para realizar a seleção das estruturas que irão ser objeto de avaliação de estabilidade (relatório a ser verificado paralelamente ao presente), e que não carregam com si incertezas intrínsecas da parametrização do modelo, foi realizado um último passo. Foram descartadas da análise das estruturas que se encontravam muito próximas das condições de contorno de montante devido a influência da entrada abrupta de vazão. Ainda, apenas no caso do trecho RGN-A, que indicou mais estruturas nas condições mencionadas, foram mantidas aquelas com velocidade superior para verificação de forma conservadora, isto é, considerando aquelas com mais fatores críticos (Tabela 5).

Tabela 5 – Avaliação das estruturas com maior risco de instabilidade e aquelas selecionadas para avaliação posterior, para todos os trechos e TR's avaliados.

Trechos avaliados	TR avaliado	Estruturas com maior risco de Instabilidade indicadas na modelagem	Estruturas selecionadas para Avaliação de Estabilidade
TG11	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	-
TG11_RM	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	-
RGN-D	TR 2A	E03 (TMM) E02 (ET)	-
	TR 25A	E03-E04 (TMM) E02 (ET)	-
	TR 50A	E03-E04 (TMM) E02 (ET)	-

Tabela 5 – Avaliação das estruturas com maior risco de instabilidade e aquelas selecionadas para avaliação posterior, para todos os trechos e TR's avaliados, continuação.

Trechos avaliados	TR avaliado	Estruturas com maior risco de Instabilidade indicadas na modelagem	Estruturas selecionadas para Avaliação de Estabilidade
RGN-C	TR 2A	E02 (TMM) E08 (ET)	E08 (ET)
	TR 25A	E03, E07, E20 (TMM) E01, E06, E08 (ET)	E20 (TMM) E08 (ET)
	TR 50A	E03, E20 (TMM) E01, E06, E08 (ET)	E20 (TMM) E08 (ET)
TG16	TR 2A	-	-
	TR 25A	E01 (FG)	-
	TR 50A	-	-
TG16_RM	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	E07 (FG)	E07 (FG)
RGN-B	TR 2A	-	-
	TR 25A	E05, E11 e E23 (ET)	E11 e E23 (ET)
	TR 50A	E19 (TMM) E05, E11 e E26 (ET)	E19 (TMM) E11 e E26 (ET)
TG29	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	-
T29_RM	TR 2A	-	-
	TR 25A	-	-
	TR 50A	-	-
RGN-A	TR 2A	-	-
	TR 25A	E05-E11, E13 (TMM) E01, E03, E12 (ET)	E07 (TMM) E12 (ET)
	TR 50A	E05-E11, E13, E18 (TMM) E01, E03, E12 (ET)	E07 (TMM) E12 (ET)

Deste modo, considerando que as estruturas com maior risco de instabilidade serão avaliadas em relatório próprio, permite-se aqui avaliar algumas constatações dos resultados encontrados na modelagem hidrodinâmica voltadas para o TR em que as condições de maior risco de instabilidade passam a ocorrer e a particularidade de cada trecho estudado, diante da metodologia adotada.

No que diz respeito a TR's associados, apenas o trecho RGN-C apontou uma estrutura em condição de instabilidade para um evento de recorrência de 2 anos, sendo que os trechos RGN-B e RGN-A indicaram a partir de um TR de 25 anos e o tributário TG-16, com influência

de remanso, indicou a partir do TR de 50 anos. Todos os outros trechos, apesar de não apresentarem as mesmas situações diante da metodologia adotada, apontaram mesma tendência de agravamento de casos de instabilidade conforme a elevação do TR do evento. Além disso, permite-se destacar que eventos superiores como de TR de 100 anos, não foram simulados.

Quanto à particularidade dos trechos estudados, constatou-se impacto significativo para o caso dos tributários apenas para o TG-16 e sob efeito de fenômeno de remanso do RGN, fato que se consolida devido a ocorrência de vazões negativas (sentido contrário à linha de energia do rio) e interferência de estrada rural cruzando o tributário (TG-16). Este impacto mais significativo neste trecho se dá pelo fato de ter uma planície de inundação ampla abrangendo toda a área de jusante de TG-16 (praticamente metade do trecho, em comprimento).

Apesar da influência negativa identificada para o caso do TG-16 e em termos de impactos da onda de cheia, no caso do TG-29 (com moradores próximos) e TG-11, acaba se verificando um abrandamento da proporção das velocidades nos tributários, por conta da vazão negativa mencionada, que adentra o mesmo proveniente do RGN. Assim, corrobora com o fato de não ter sido encontrado indicativos de instabilidade para estes dois últimos tributários, em nenhuma estrutura nem TR, para os critérios considerados.

Vale a ressalva de que as dimensões inferiores em relação as estruturas do RGN assim como as premissas básicas para fixação das estruturas, serão exploradas no Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024b). Tais fatores físicos assim como dados geotécnicos e entre outros, que são igualmente importantes para um parecer conclusivo final, devem ser levados em consideração, no que tange às incertezas, quando da interpretação dos resultados aqui apresentados.

Referente aos trechos do RGN, todos eles demonstraram características particulares, destacando-se:

- RGN-A: apresenta a maior vazão entre os trechos, decorrente de sua localização significativamente mais a jusante na bacia hidrográfica. Em virtude dessa condição, verifica-se maior quantidade de estruturas contempladas em áreas de velocidade crítica da calha do RGN. Vale ressaltar que existem áreas críticas naturais, entretanto não significa que irá causar prejuízos nas posições atuais das estruturas, a não ser que seja

destacada no Relatório de Estabilidade das Estruturas tratado em concomitante com o presente trabalho. Destaque para as estruturas ET que demonstraram ter maior presença em áreas de velocidade crítica e potencial erosivo;

- RGN-B: Para este trecho, as simulações realizadas não evidenciaram impactos significativos na calha do rio, identificando-se o extravasamento em muitas planícies de inundação, durante a avaliação dos eventos de cheia. Devido a sua sinuosidade, muitas estruturas TMM evidenciaram-se como pontos de atenção, por consequência, pontos de alerta para potencial erosivo. Estruturas ET seguem com as mesmas constatações do trecho anterior. Vale destacar a presença de corredeiras ao término do referido trecho, conferindo ao mesmo mais energia ao final de seu trecho;
- RGN-C: Para este trecho, as simulações realizadas se assemelham a RGN-A, porém com vazão consideravelmente inferior. Não se evidenciaram impactos significativos nem extravasamentos relevantes nas áreas de entorno da calha do rio, com exceção de pontos com afluência de tributários imediatamente no seu início e ao seu final, por consequência, influenciando nas velocidades críticas avaliadas durante a avaliação dos eventos de cheia. Estruturas ET seguem com as mesmas constatações do trecho anterior;
- RGN-D: Para este trecho, as simulações realizadas se assemelham a RGN-B, tendo as simulações indicado impactos significativos na velocidade, mais próximo ao final do trecho, durante a avaliação do evento de cheia. Isso se deve à presença de um empreendimento desativado de aproveitamento hidrelétrico e a existência de uma queda d'água em dois sentidos, resultando em velocidades superiores. Se evidenciaram extravasamentos relevantes nas áreas de entorno da calha do rio, principalmente próximos a curva existente no trecho, por consequência, influenciando nas velocidades críticas avaliadas para algumas estruturas TMM. Estruturas ET seguem com as mesmas constatações do trecho anterior.

Com base nos resultados verificados, as estruturas não afetam o comportamento hidráulico geral da calha do RGN e seus tributários para nenhum dos cenários avaliados. Existe baixo risco de erosão associada à presença de velocidades críticas, ao longo das margens do RGN e as estruturas localizadas junto as margens não devem ser afetadas e/ou danificadas por processos erosivos, majoritariamente, sendo que, nos casos mais severos, o Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024b) indicará medida apropriada para

tal condição. Vale ressaltar que o processo de erosão na calha do RGN e tributários também poderia ocorrer da mesma forma se não houvesse a instalação dos troncos de madeira, sendo este um dos motivos em se realizar a classificação entre “pontos de atenção” e “pontos de alerta”, para consideração independente, e separando situações naturalmente com velocidades críticas das influências diretas ocasionadas pela instalação das estruturas.

Entretanto, como verificado para todos os trechos do RGN, há um maior potencial erosivo no centro da calha do RGN, fato que se explica pela maior presença de estruturas ET em risco de instabilidade. O fato de as estruturas não serem projetadas para resistir a velocidades superiores a velocidade crítica avaliada incorre no risco de que algumas estruturas, especialmente aquelas instaladas na região central do rio (ET), sejam transportadas durante eventos extremos, situação já deflagrada em eventos anteriores em outros trechos em processo de renaturalização. As propostas para mitigação desses efeitos serão apresentadas no Relatório de Estabilidade (APLYSIA, 2024).

É possível observar que as velocidades incrementais mais acentuadas permanecem principalmente no centro, ou então nas extremidades das estruturas. Fica também evidente nos mapas um acréscimo nas velocidades em regiões que não estão nas imediações das estruturas, podendo haver influência de tributários (RGN-C), por exemplo. Entretanto, é importante relembrar que a malha base possui elementos de aproximadamente 1,0 m, com refinamento na calha do rio com elementos de 0,3 m. De forma geral, as estruturas posicionadas nas margens proporcionam uma diminuição nas velocidades ao seu redor e um pequeno aumento nas velocidades na calha do rio, aonde o fluxo se concentra.

Programas de inspeção e manutenção das estruturas, como os executados nos trechos 6, 7 e 9 do RGN, se apresentam como uma alternativa mitigadora de falhas potenciais, sendo mais bem explanado em Relatório de Estabilidade de Estruturas (APLYSIA, 2024). Com relação às estruturas posicionadas na calha tanto dos tributários como do RGN, de maneira geral, as velocidades resultantes nas suas imediações também apresentaram redução, acompanhadas de um aumento nas suas extremidades na mesma ordem de grandeza das estruturas das margens. Da mesma forma, como nas estruturas posicionadas nas margens, esse pequeno aumento nas velocidades que pode ocasionar erosões localizadas, provenientes tanto dos pontos de atenção como pontos de alerta, apresentados no presente relatório.

8. LIMITAÇÕES E INCERTEZAS

O modelo HEC-RAS 2D possui a precisão dos resultados obtidos dependente diretamente da qualidade dos dados de entrada e das premissas adotadas. Deste modo, as principais limitações e incertezas são:

- O modelo tridimensional da calha do rio é baseado na interpolação de seções batimétricas ou transectos espaçados a cada 25m aproximadamente, estimando a distância por meio de 20 passos de aproximadamente 1m dentro do leito do rio, em áreas onde foi possível cruzar a pé, devendo-se a isso algumas irregularidades remanescentes na interpolação do MDT;
- Condição de contorno de jusante utilizando uma declividade média normal a partir do levantamento planialtimétrico e batimétrico;
- Coeficientes de Manning padronizados;
- Ausência de escopo específico de regionalização hidrológica robusta para os tributários;
- Devido a busca por parcimônia (ótimo rendimento e velocidade ágil de processamento da simulação) em relação a passo de tempo da simulação e detalhamento da malha, foi utilizada malha com 30cm para rodadas na faixa de 0,1s a 0,4s;
- Correção de erros de calha da batimetria, como interpolações indevidas e objetos que interferiram pontualmente na coleta do ponto, não foram realizadas e podem influenciar estruturas específicas para certos eventos.

É importante ressaltar que a avaliação em questão está relacionada ao potencial erosivo incremental que a instalação das estruturas pode causar. Ou seja, a ordem de grandeza das análises que se torna um fator preponderante para realizar constatações. Dessa forma, levando em consideração a abordagem utilizada, permitiu-se fazer as avaliações mesmo com base nas limitações e incertezas mencionadas.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a avaliação final das alterações nos padrões de velocidade ao longo dos trechos, foi possível validar diversas premissas como áreas de potencial velocidade crítica e de potencial erosivo maior para estruturas específicas, assim como permanece a recomendação da continuação da aplicação das técnicas de renaturalização no rio Gualaxo do Norte.

Ao comparar a modelagem hidráulica sem estruturas e com as estruturas já implantadas, quanto a aspectos de velocidades críticas, podem ser constatados:

- As diferenças das velocidades nos dois casos apresentaram-se compatíveis com estudos de Aplysia (2020c) e estudos anteriores, verificando-se faixas de velocidades incrementais semelhantes;
- As ocorrências em destaque servem para avaliação de criticidade natural do relacionamento da calha dos trechos com o escoamento simulado. Deste modo, o monitoramento dos efeitos hidrodinâmicos da alteração do padrão de velocidades ocorre ao avaliar as situações de instabilidade tanto para calha do rio (pontos de atenção) como para a estrutura instalada (pontos de alerta). Durante o evento de cheia, cumulativamente ocorre: deflagramento de velocidades críticas para erosão natural (3m/s nos tributários e 4m/s no RGN) e, em seguida, velocidade incremental gerada pelas estruturas superior a 10% (0,3m/s para os tributários e 0,4m/s para o RGN). Vale destacar que a ocorrência no centro da calha deve ser acompanhada de forma prioritária em relação a região das margens, devido a repetição de estruturas ET evidenciadas nos resultados encontrados;
- De forma geral, nas regiões imediatamente a montante e jusante das imediações das estruturas, os padrões de velocidade sofrem um efeito de redução, restringindo tal fenômeno no que diz respeito ao sentido perpendicular em relação ao fluxo de escoamento do rio (limitado no alcance da "pluma" de interferência da estrutura);
- Com relação às estruturas posicionadas na calha do rio, de maneira geral, as velocidades resultantes nas suas imediações também apresentaram redução, acompanhadas de um aumento nas suas extremidades na mesma ordem de grandeza das estruturas das margens. Vale ressaltar ainda, conforme em NHC (2020), que processos desse tipo podem ocorrer da mesma forma se não houvesse a instalação de troncos de madeira;

- Nos demais locais afetados (Elevação/Redução na região central da calha do rio ou Redução na região das margens), ou ainda, sem interferência direta das estruturas, os indicativos para monitoramento encontrados são de ordem irrelevante em termos de valor absoluto para fenômenos de erosão ou desestabilização das estruturas, sendo exclusivamente para os TRs considerados.

10. DADOS DA CONTRATANTE E CONTRATADA

10.1 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE

Razão Social: Fundação Renova
Número do CNPJ: 25.135.507/0001-83
Endereço: Av. Getúlio Vargas, 671 - Belo Horizonte- MG/CEP: 30112-021
E-mail: hana.fernandes@fundacaorenova.org
Telefone: (31) 3289-9836

10. 2 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATADA

Razão Social: APLYSIA ASSESSORIA E CONSULTORIA LTDA
Número do CNPJ: 02.290.210/0001-97
Endereço: Rua: Júlia Lacourt Penna, 335 - Jardim Camburi - Vitória - ES/CEP: 29090-210
E-mail: noelle@aplysia.com.br
Telefone: (27) 3024-8303

11. EQUIPE TÉCNICA

Equipe Técnica			
Responsabilidade / Cargo	**Nome**	**Formação**	**Conselho Regional**
Diretora Técnica	Dr. Tatiana Heid Furley Libardi da Penha	Bióloga	15.386/02
Diretora de Projetos	Noelle Arruda	Oceanógrafa	-
Gerente de Projetos	Joselaine Lombardi Siqueira	Bióloga	60791/02
Elaboração do Relatório	Dr. Víctor Luís Padilha	Engenheiro Ambiental	132.160-0 SC
Revisão do Relatório	Dr. Douglas de Pádua Andrade	Biólogo	104.366/04D
Coordenadora de Campo	MSc. Kátia Regina Chagas	Bióloga	65.888/02

Legenda: - = profissionais que não possuem Conselho Profissional

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇÃO CIVIL PÚBLICA **- n° 69758-61.2015.4.01.3400**. Minas Gerais, 2015.

AÇÃO CIVIL PÚBLICA - **n° 1000242-22.2020.4.01.380**. Minas Gerais, 2020.

ALCOFORADO, R. G.; CIRILO, J. A. Sistema de suporte à Decisão para análise, Previsão e Controle de Inundações. Revista Brasileira dos Recursos Hídricos - **RBRH**, v. 6, n. 4, p. 133-153. Out/Dez. 2001.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Relatório de campo. **Definição de Trecho para Expansão do Projeto Renaturalize**. Relatório de Campo n° 436/2020, revisão 02. 2020a.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. **8ª Avaliação da Manutenção das Instalações das Estruturas de Madeira** – Relatorio.374/2020, revisão 02. 2020b.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. **Modelagem Hidráulica do Trecho do Projeto de Expansão de Renaturalização** – Relatorio.466/2020, Revisão 03. 2020c.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. **Estabilidade das Estruturas do Projeto de Expansão de Renaturalização**. Relatório Técnico n° 473/2020, Revisão 05. 2020d.

APLYSIA. Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte. **Etapa 1: Validação dos Trechos, Pré-Design de Instalação, Topobatimetria e Protocolo de Avaliação de Habitats**. Relatório de Campo 237/2023. Revisão 01. 2023a.

BENKE, A.C.; WALLACE, J. B. Influence of wood on invertebrate communities in streams and rivers. **Ecology and Management of Wood in World Rivers**, v. 37, p. 149-177, 2003.

BENNETT, C.; GILCHRIST, W. **Riverflies. In Silent Summer**. New York: Cambridge University Press, 2010.

BROOKS, A. Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams. Land & Water Australia, Canberra. 2006.

CALÇADA, M.; PORTELA, M; MATOS, J. Análise de Cheias e Delimitação de Zonas Inundáveis em Timor-Leste: Abordagem por Modelação Geográfica. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7o, 2003, Lisboa. **Anais**... Lisboa: APRH, 2003.

CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. Caldwell: McGraw Hill Book Company, Inc; Tokyo: Kogakusha,, 1959. 680 p.

CORRELL, D. L. Principles of planning and establishment of buffer zones. **Ecological Engineering**, v. 24, n. 5, p.433-439, 2005.

CULP, J. M.; SCRIMGEOUR, G. J.; TOWNSEND, G. D. Simulated fine woody debris accumulations in a stream increase rainbow trout fry abundance. **Transactions of the American Fisheries Society**, v.125, n. 3, p.472-479, 1996.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília. Ministério de Minas e Energia. 2000.

EXTENCE, C.A.; CHADD, R.P.; ENGLAND, J.; DUNBAR, M.J.; WOOD, P.J.; TAYLOR, E.D. The Assessment of Fine Sediment Accumulation in Rivers Using Macro-Invertebrate Community Response. **River Research and Applications**, v. 29, n. 1, p.17-55, 2013.

FRANÇA, B. T.; RIBEIRO, C. B. M. Modelagem hidrológica e hidráulica para mapeamento de áreas de risco de inundações urbanas na bacia hidrográfica do rio pomba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais**... Porto Alegre: ABRH, 2013.

FURLEY, T.H.; CALADO, S.L.M.; MENDES, L.B.; CHAGAS, K.R.; ANDRADE, D.P.; ALVES, C.B.M.; BELO, P.I.D.; RIBEIRO-FILHO, P.S.M.; NIENCHESKI, L.F.H. Short-term hydromorphological and ecological responses of using woody structures for river restoration in a tailing-impacted tropical river. Integrated Environmental **Assessment and Management**, Special Series, 2022.

GIPPEL, C. J. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. **Journal of Environmental Engineering**, v.121, n.5, p.388-395, 1995.

GUL, G.O; HARMANCIOGLU, N.; GUL, A. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. **Natural Hazards**, v. 54, n. 2, p. 245–260, 2009.

HEIMHUBER, V. GIS **Based Flood Modeling as Part of an Integrated Development Strategy for Informal Settlements**. 2013. 129 f. Thesis (Master of Science) – Technische Universitat Munchen, Germany, 2013.

IDE-SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Ottobacias**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2023. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso em: 20 dez. 2023.

JACOBS; CH2M. **Plano de Manejo de** Rejeito. Revisão 1. 2017.

KAUFMANN, P.; LEVINE, P.; ROBISON, E.; SEELIGER, C.; PECK, D. Quantifying physical habitat in wadeable streams. Environmental Protection Agency (EPA), Washington. 1999.

KNEBL, M. R.; YANGA, Z. L.; HUTCHISONB, K.; MAIDMENT, D. R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, p. 325-336, 2004.

KOUTROULIS, A.G.; TSANIS, I.K. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 385, p. 150–164, 2010.

KOVACS, S.; KISS, A.; SZEKERES, J. Experiences in application of HEC-RAS model under circumstances of flood waves. In: SCHANZE, J.; ZEMAN, E.; MARSALEK, J. (eds**.). Flood Risk Management - Hazards**, Vulnerability and Mitigation Measures. Springer, 2006. p. 47–58.

HJULSTROM. Estudos da atividade morfológica dos rios ilustrados pelo rio Fyris. Boletim do Instituto Geológico de Uppsala 25, 221–527, 1935.

NASCIMENTO, N.O.; BARBOSA, R.L.A; COSTA, O.V; BAPTISTA, M.B. Relações entre o planejamento urbano e o planejamento dos sistemas de drenagem: Estudo de caso do Ribeirão Areias em Betim, MG. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 20., 2000, Porto Alegre. **Anais**... Rio de Janeiro: ABES, 2000.

NEUHAUS, V.; MENDE, M. Engineered Large Wood Structures in Stream Restoration Projects in Switzerland: Practice-Based Experiences. **Water**, 2021.

NEOVISION. Serviço de Levantamento Topobatimétrico em trechos do Rio Gualaxo do Norte e córregos tributários por Aerotopografia Digital. Relatório Técnico RT_APLNV_01-2023_REV00, 2023.

NHC. **Avaliação do Projeto Piloto de Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte**. Relatório Técnico Preparado para a Fundação Renova. Fevereiro de 2020a.

NHC. **Peer Review do Estudo Hidrológico de Regionalização de Vazão Para o Projeto Piloto de Renaturalização (Trecho 6 e Trecho 7) e da Estação de Tratamento Natural (ETN)** – 7005470-OS09-id01. Agosto de 2020b.

NHC. **Avaliação inicial de áreas prioritárias a receberem intervenções para recuperação de habitats**. Revisão 06. São Paulo, 2022a.

NHC. **Mapeamento de Habitats Físicos nos Trechos T06 À T11 e Definição Da Condição de Referência**. Relatório Final. Revisão 3. São Paulo, agosto de 2022b.

NHC. Memorando Técnico 2. **Comentários sobre as observações de campo**. São Paulo. Revisão 2, 2023.

OLSEN, A. R.; PECK, D. V. Survey design and extent estimates for the Wadeable Streams Assessment. Journal of the North American Benthological Society, Washington, v. 27, n. 4, p. 822-836. Dec. 2008.

NETO, A. R.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v.21, n.2, p. 377-390, 2016.

NETO, A. R.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. de O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos hídricos - RBRH**, v. 20, p. 394-403, abr./jun. 2015.

OLEYIBLO, J.O.; LI, Z. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'na catchments in China. **Water Science and Engineering**, v.3, p.14-22, 2010.

RECLAMATION AND U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Large Wood Research Workshop Summary Report**, workshop held February 14 to 16, Seattle, Washington, 2012.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. **Journal of Hydrology**, n. 458-459, p. 68–86, 2012.

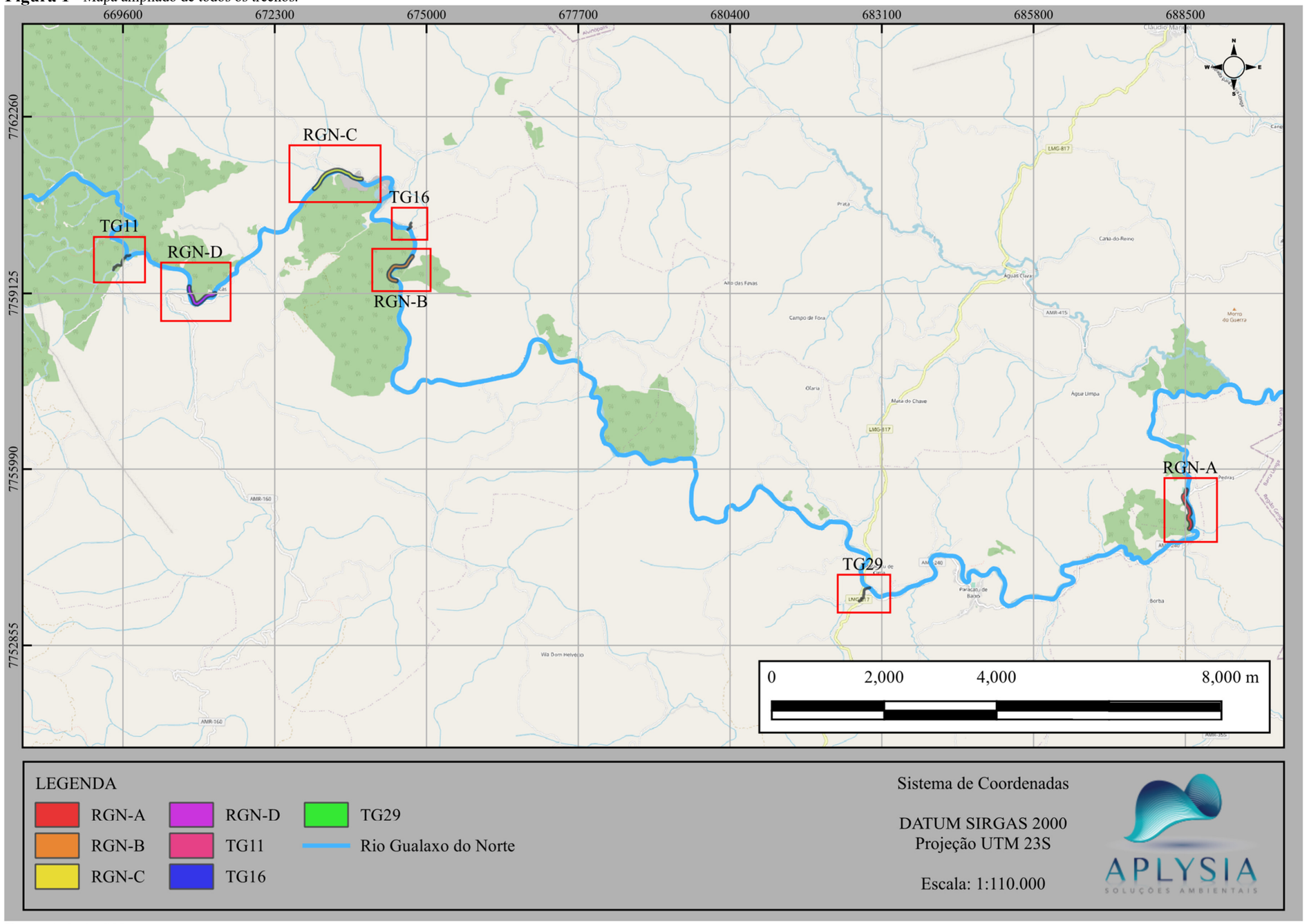
WALM. **Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte** – SE23146 – Relatório Técnico – Civil (Drenagem) – N010600-D-1RT014_R-02. 2019a.

WALM. **Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte** – SE23146 – Relatório Técnico – Civil (Drenagem) – Regionalização de Vazões da Bacia dos Rios Gualaxo do Norte e do Carmo - N010600-D-1RT011_R-2. 2019b.

WHEATON, J.M.; BENNETT, S.N.; BOUWES, N.; MAESTAS, J.D.; SHAHVERDIAN, S.M. (Editors). **Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes: Design Manual**. Utah State University Restoration Consortium. 2019.

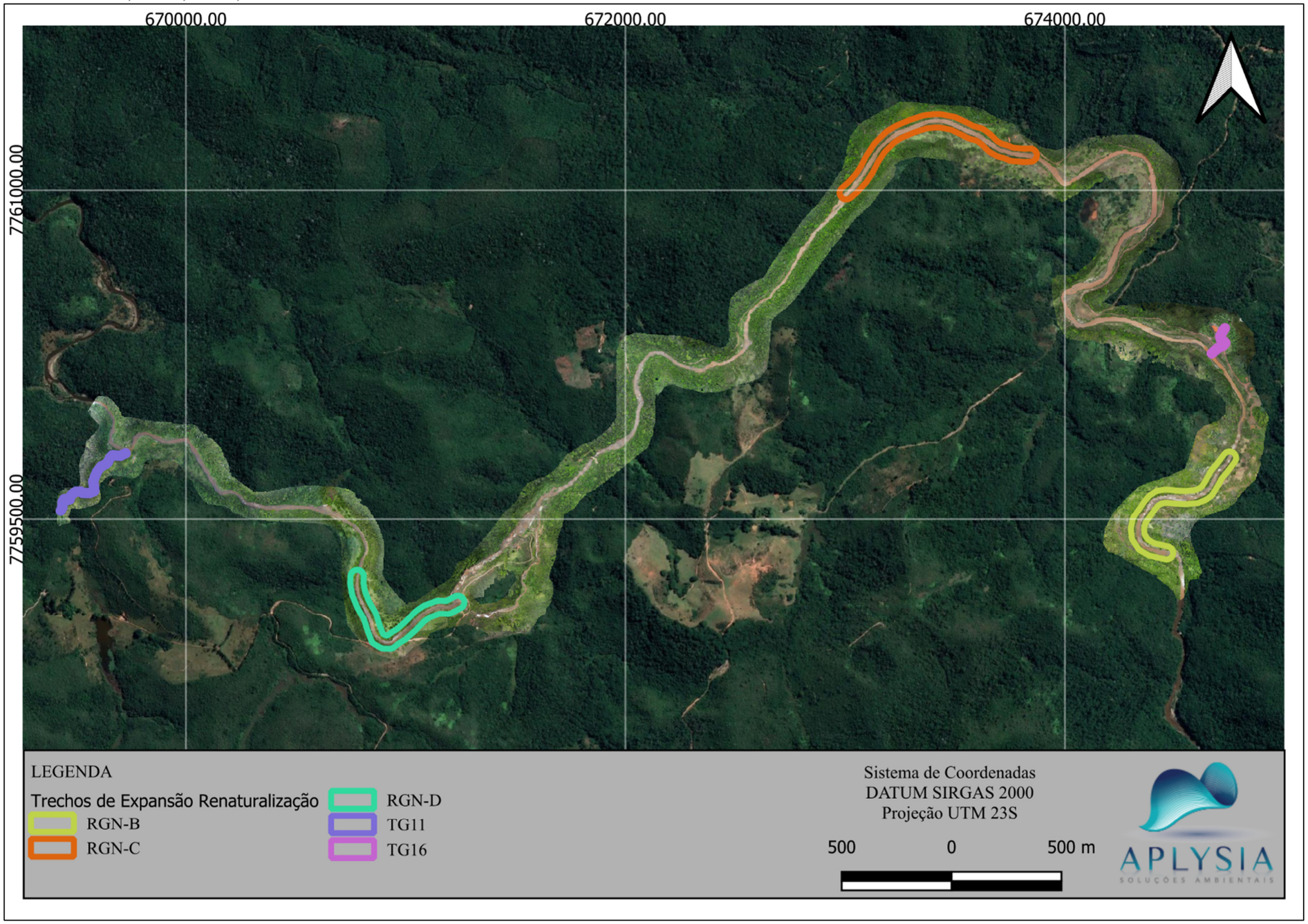
ANEXOS

Figura 1 - Mapa ampliado de todos os trechos.



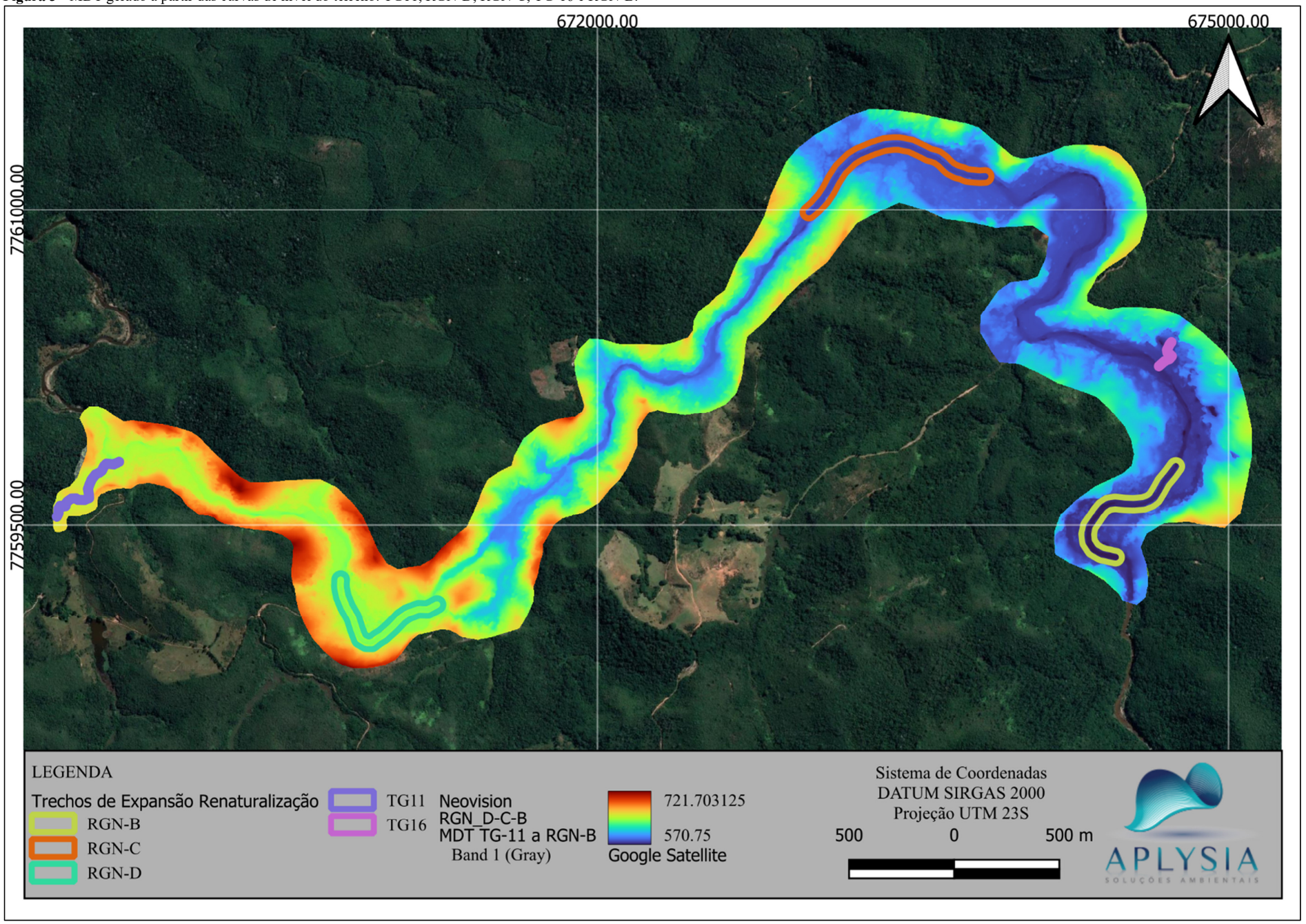
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 2 - Ortofoto aérea: TG11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 3 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: TG11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.



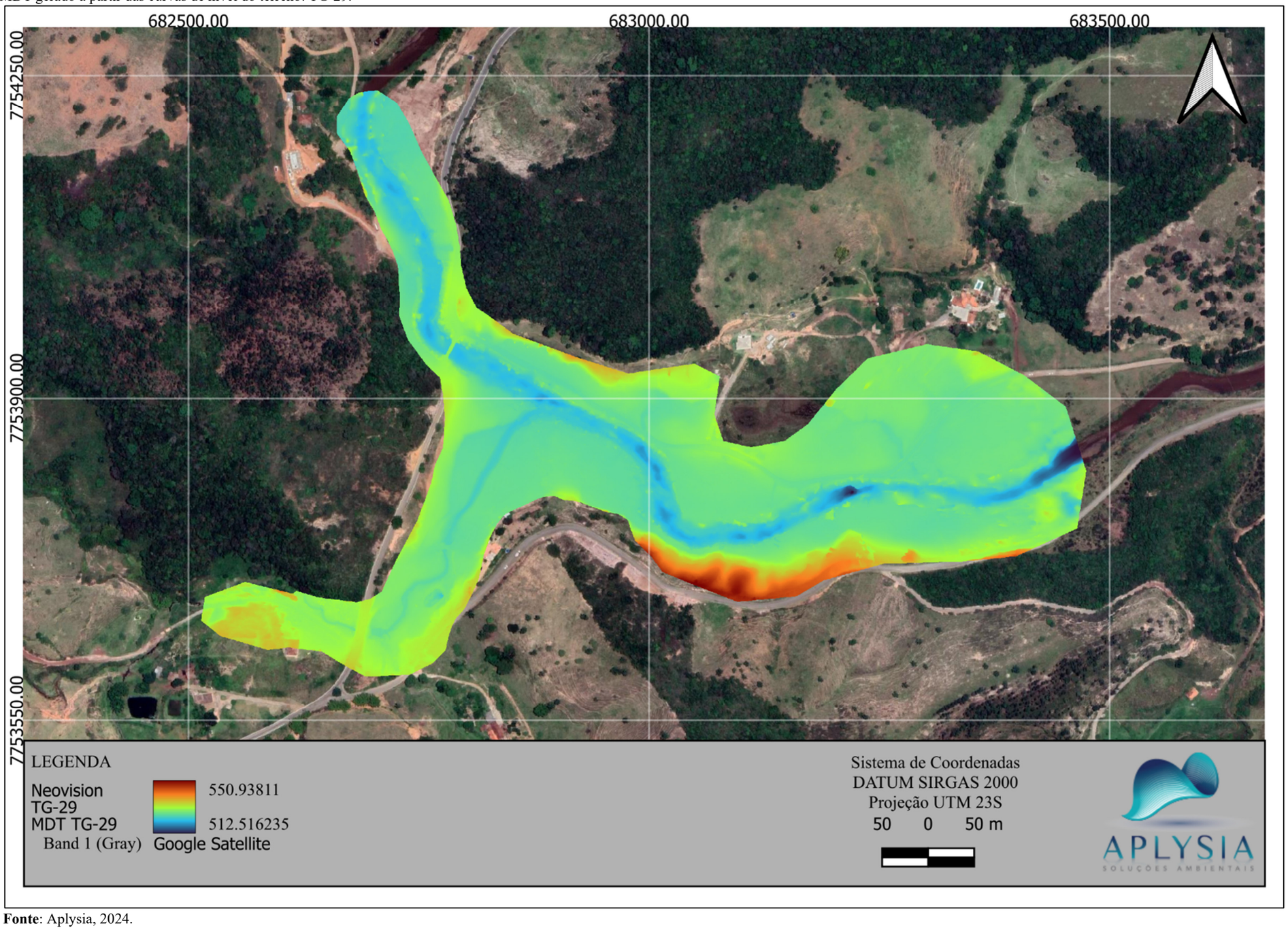
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 4 - Ortofoto aérea: TG-29.



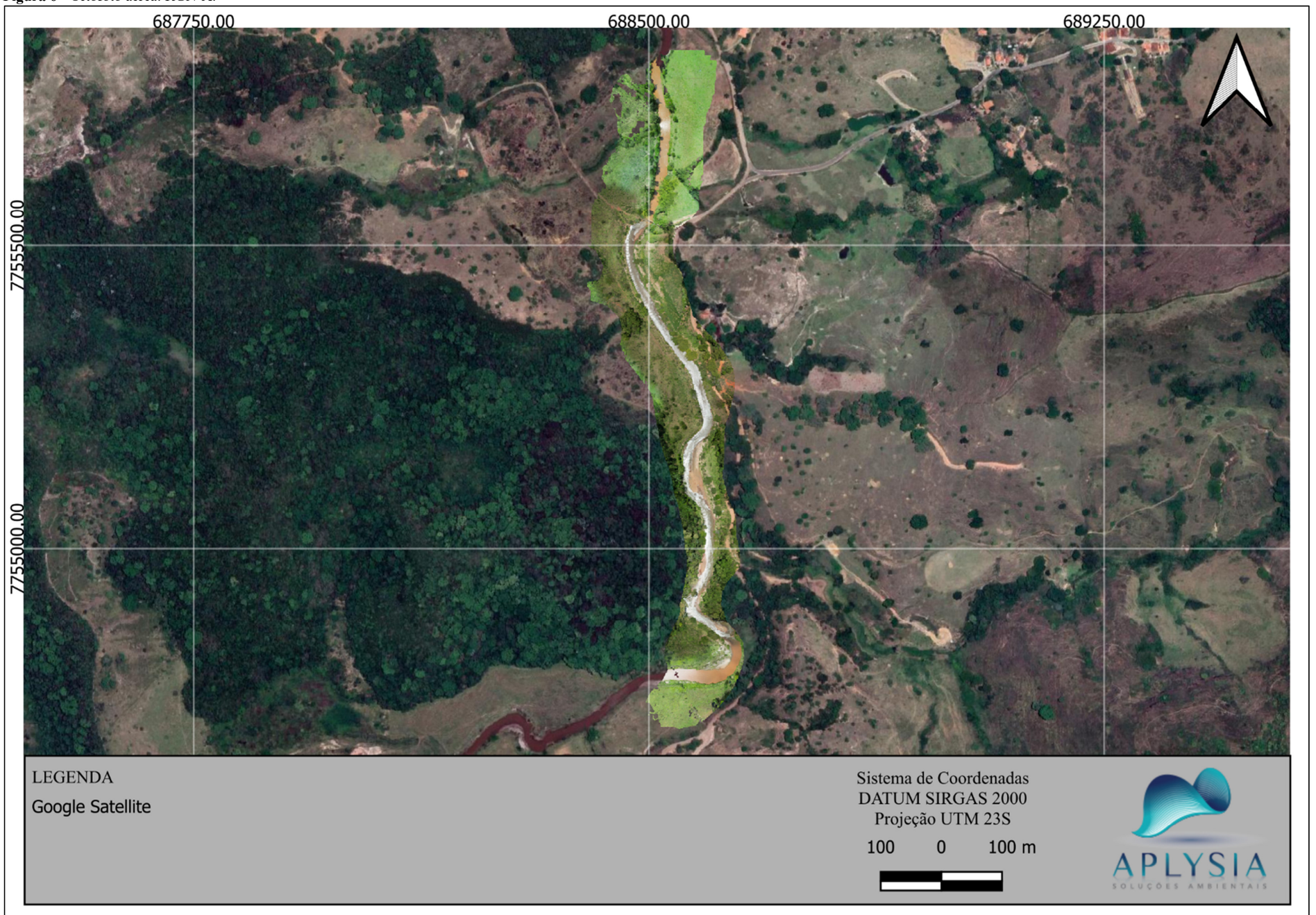
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 5 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: TG-29.



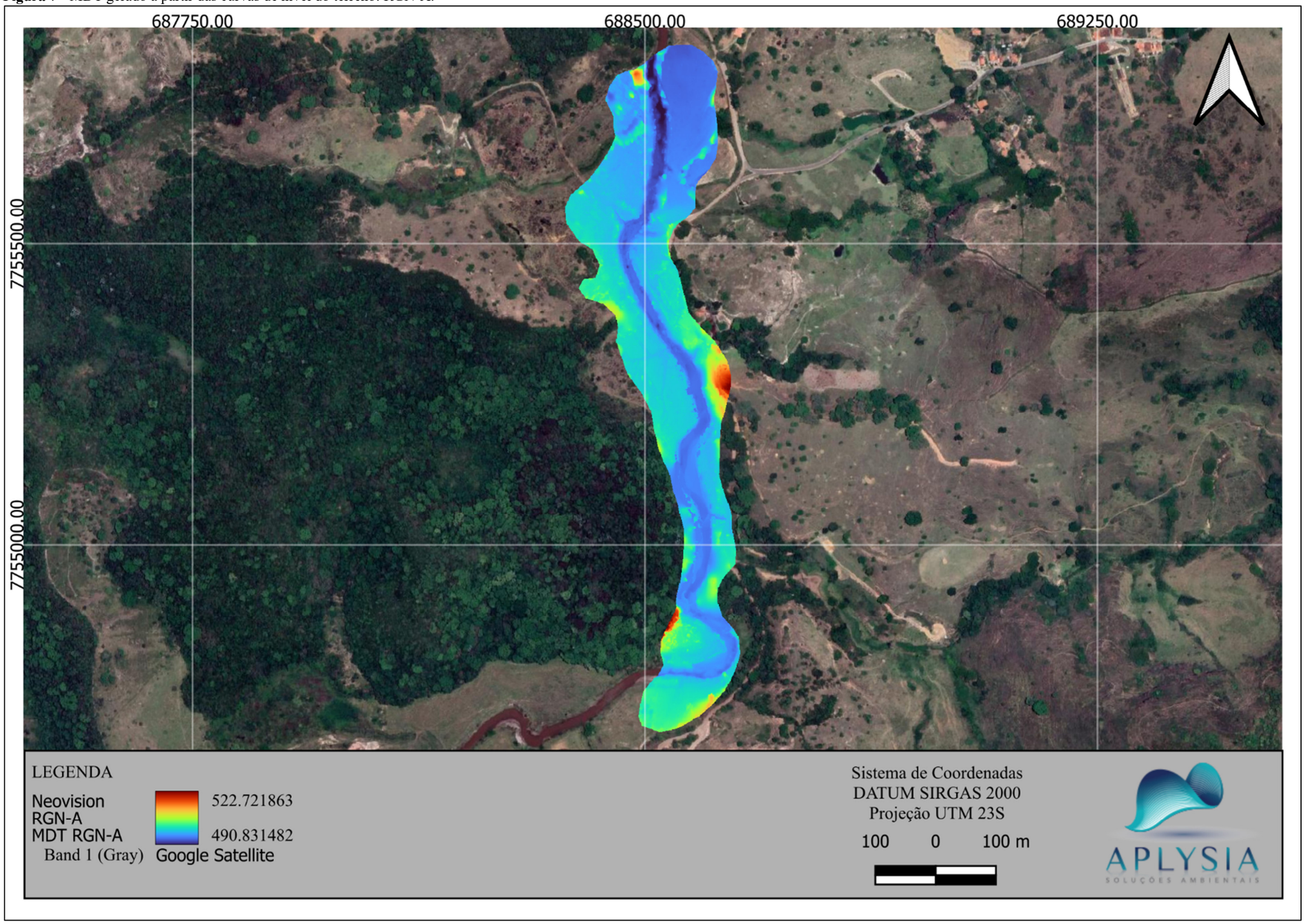
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 6 - Ortofoto aérea: RGN-A.



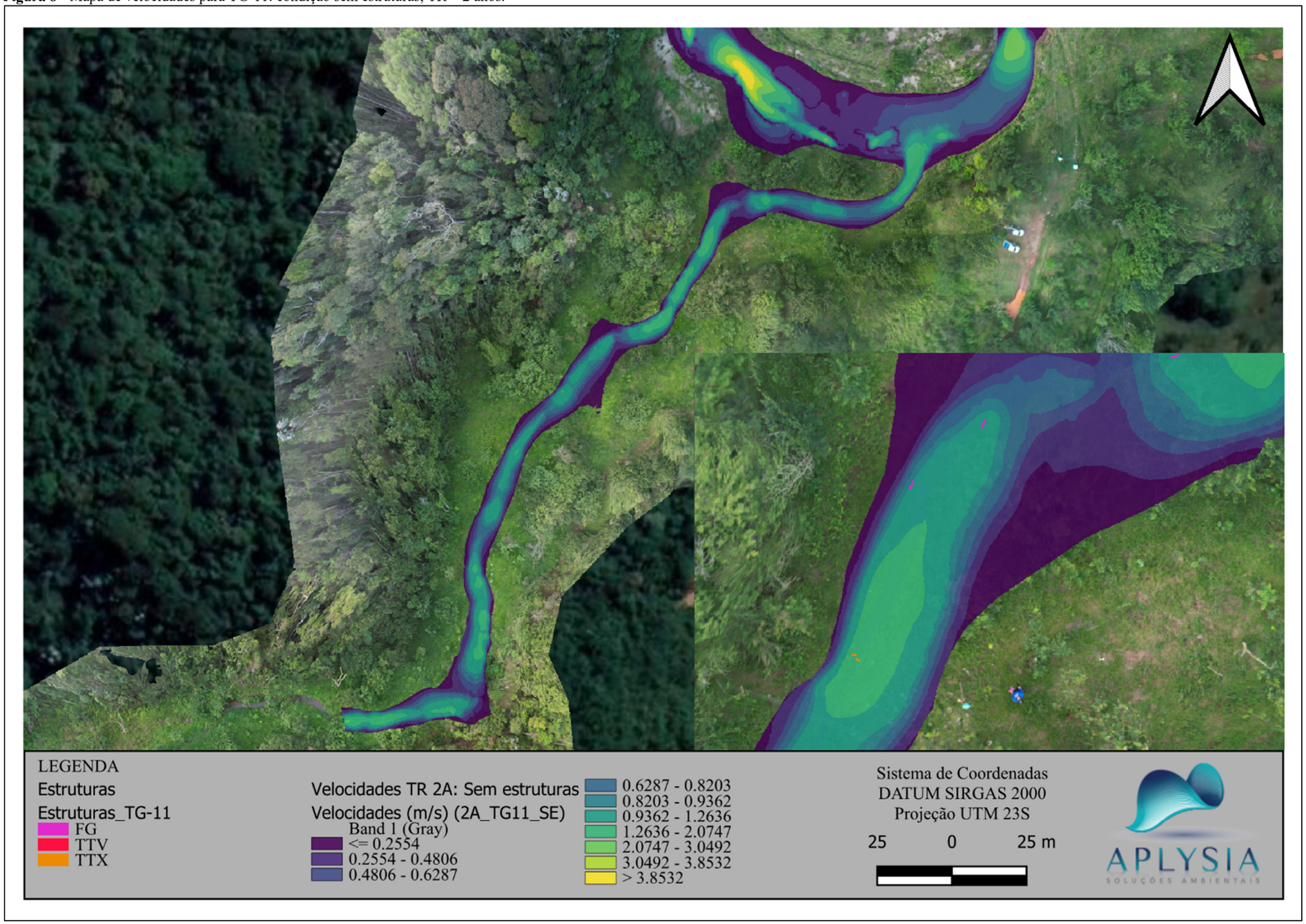
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 7 - MDT gerado a partir das curvas de nível do terreno: RGN-A.



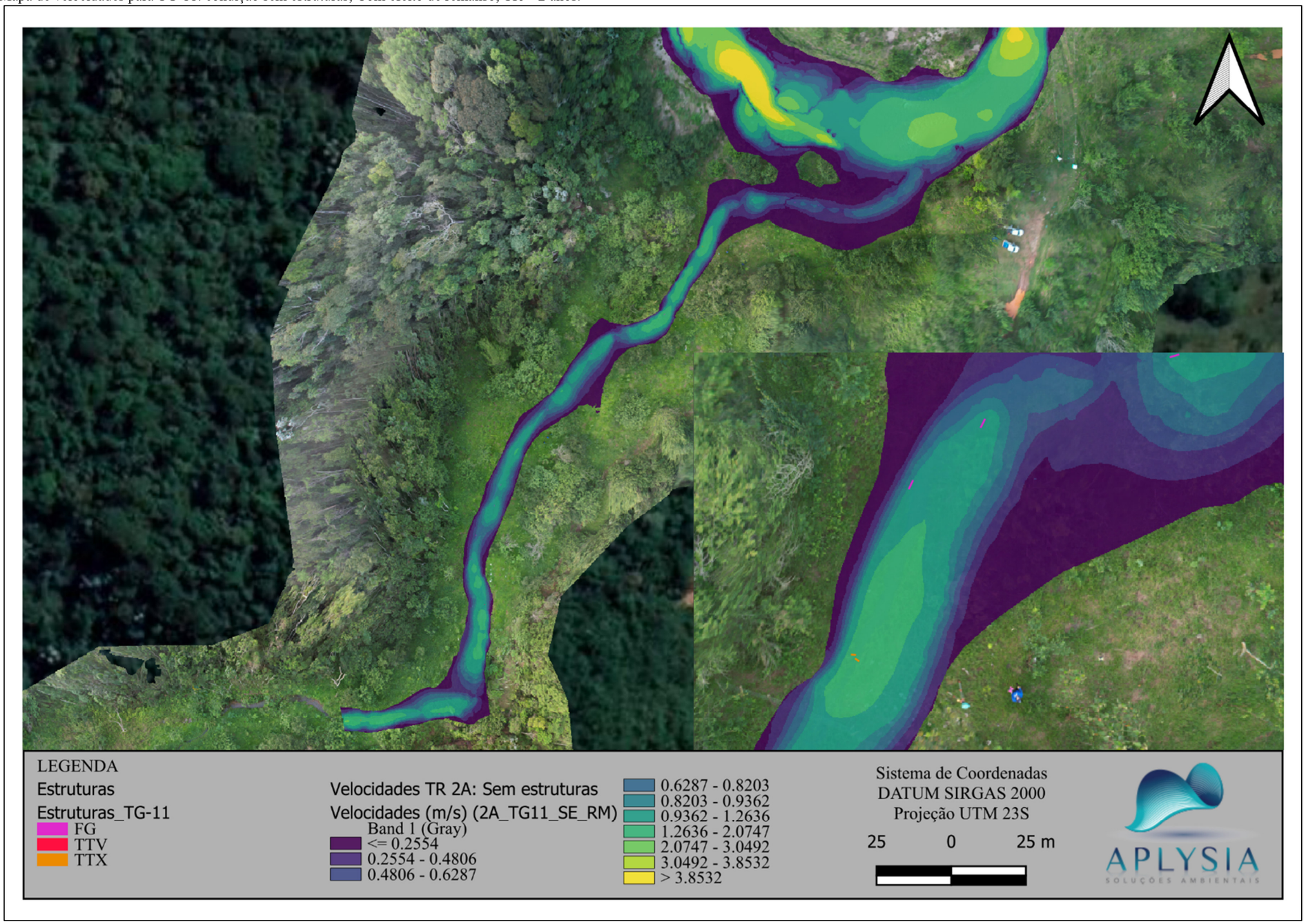
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 8 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



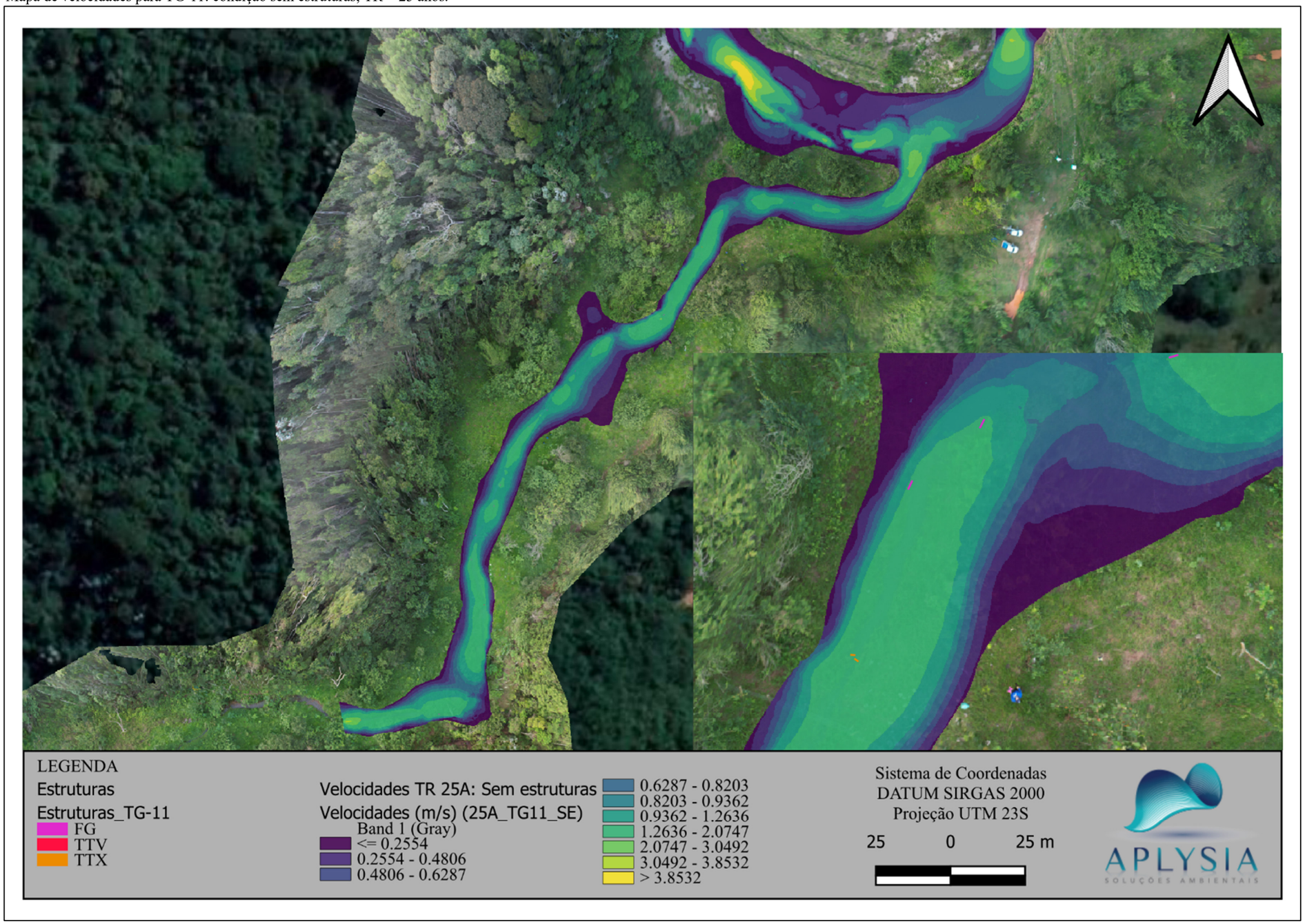
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 9 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



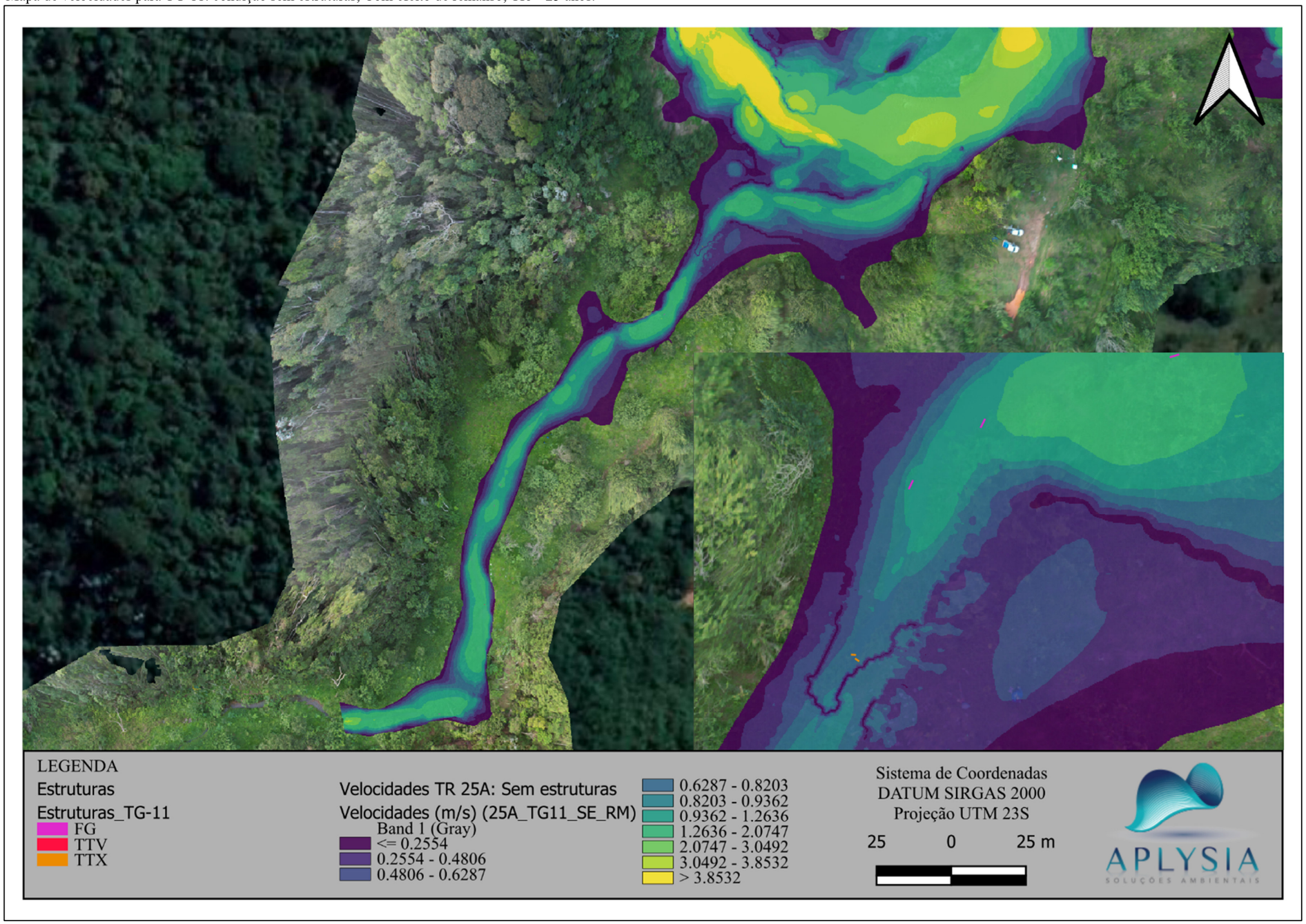
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 10 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



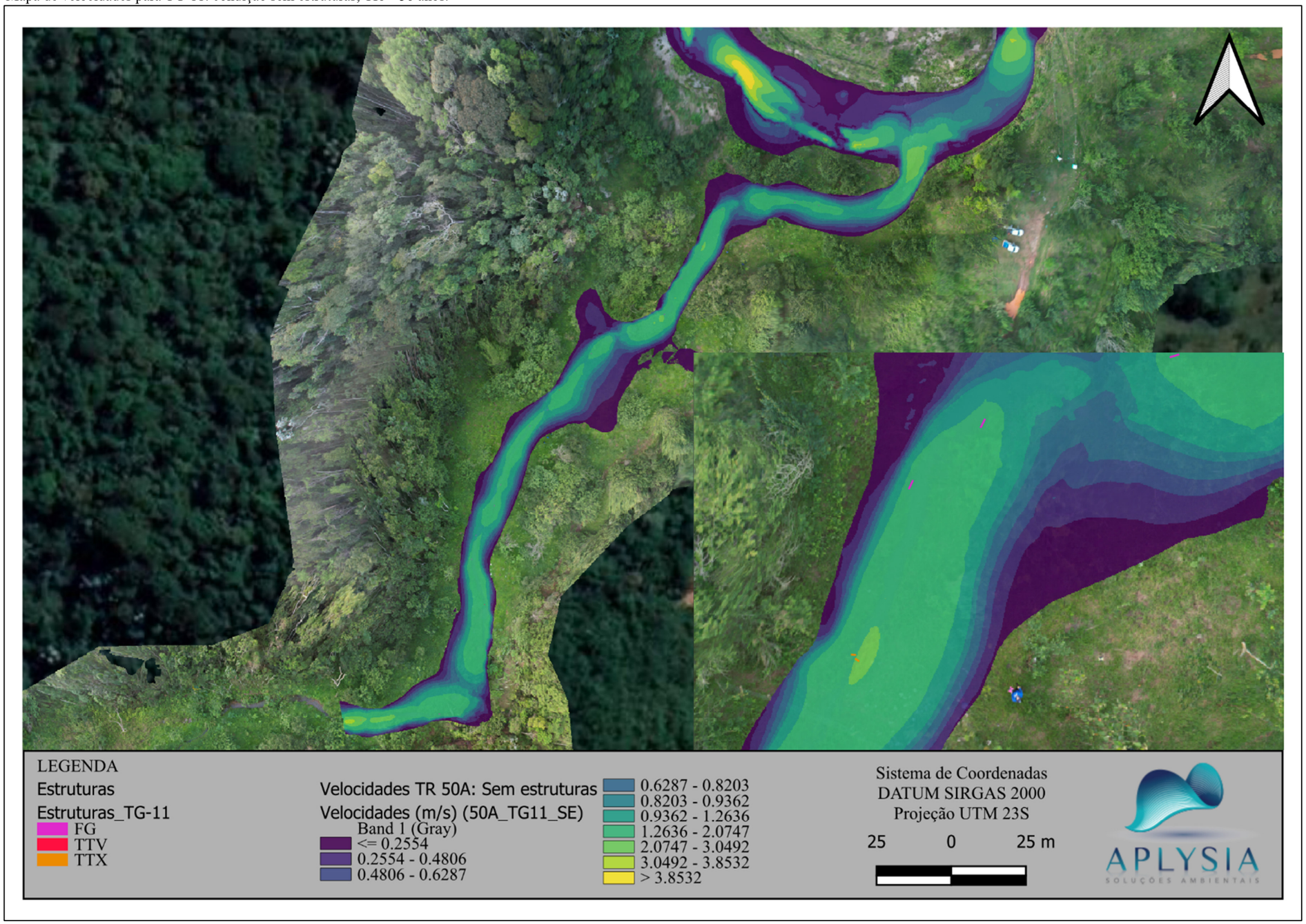
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 11 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



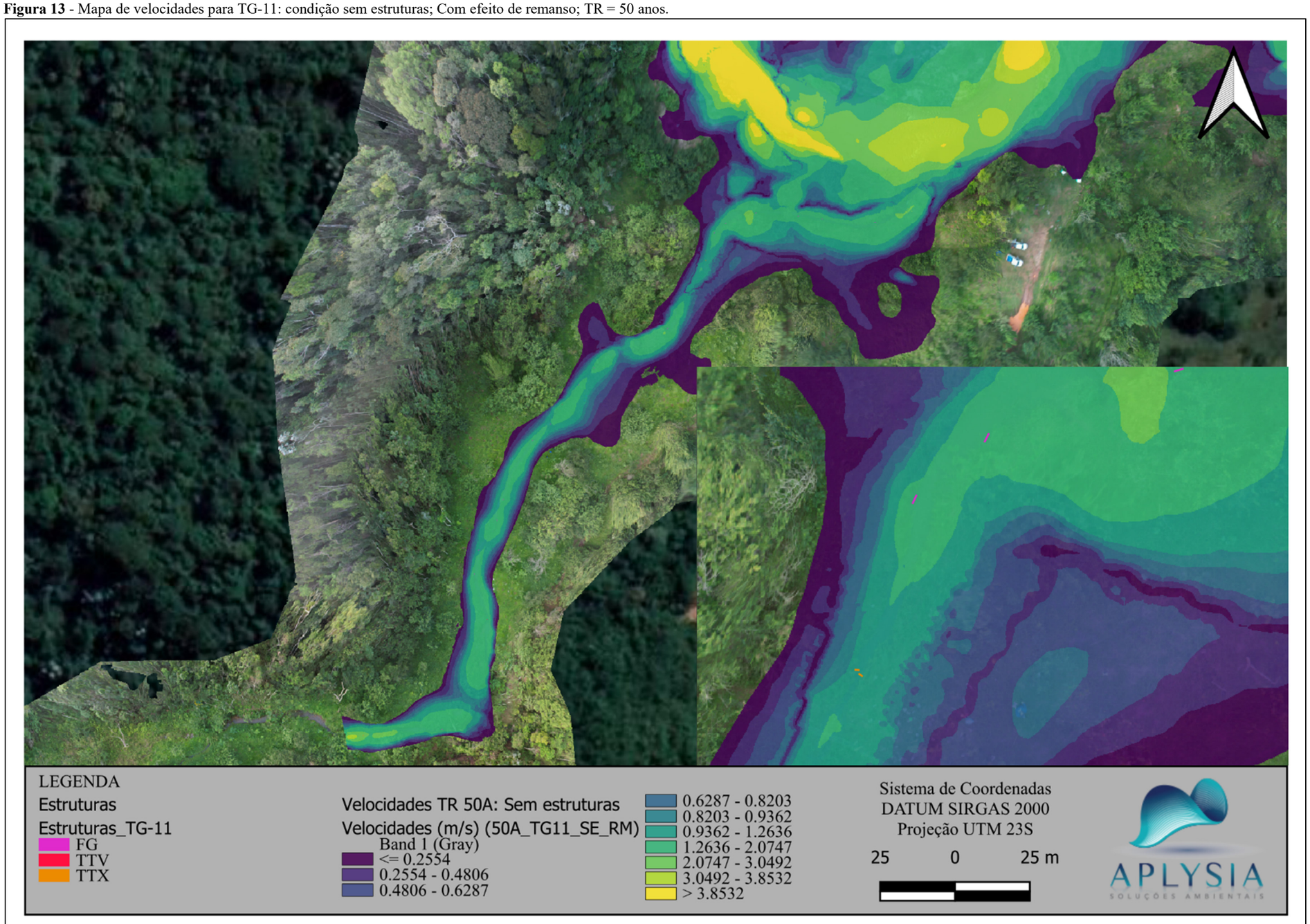
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 12 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



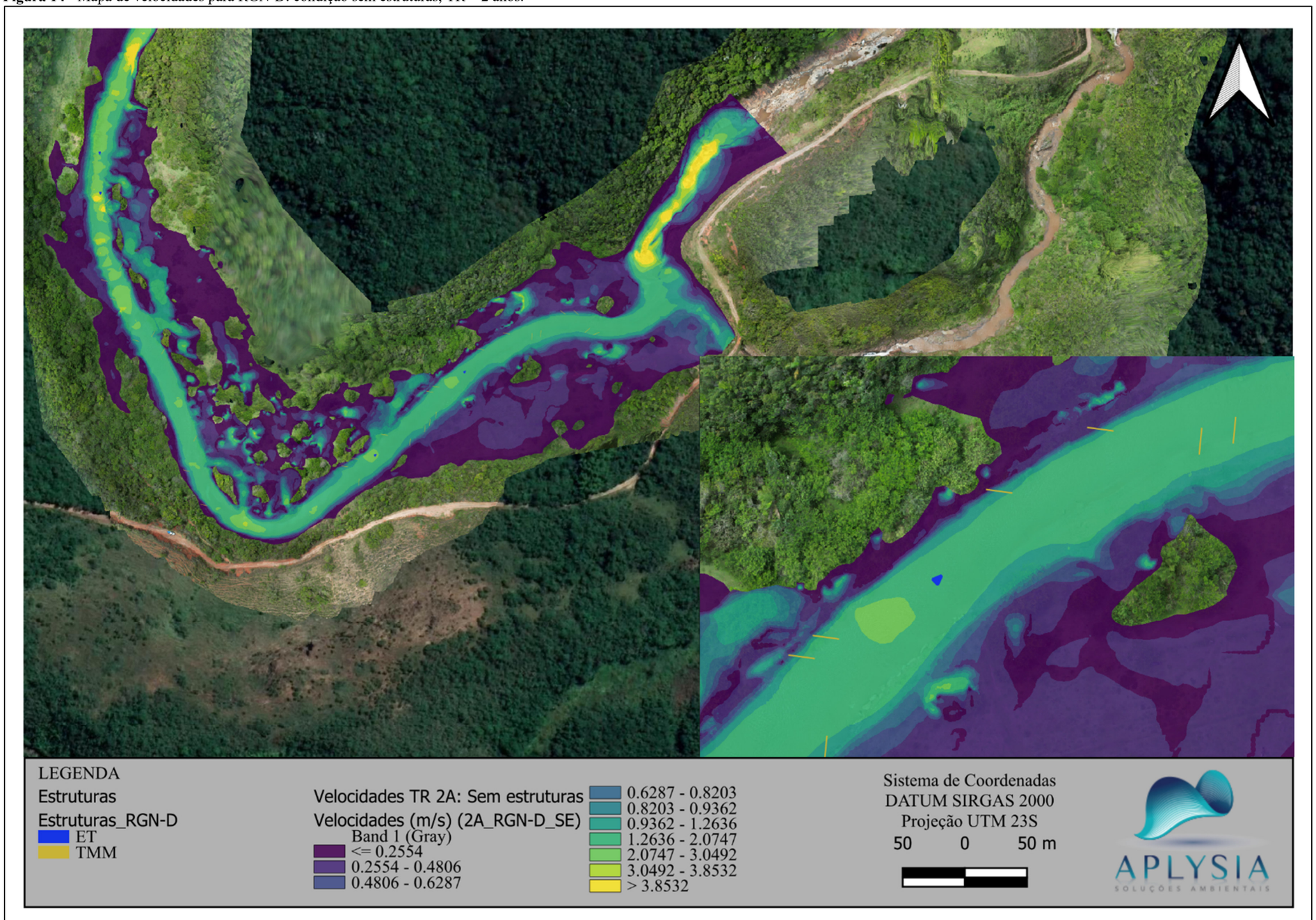
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 13 - Mapa de velocidades para TG-11: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



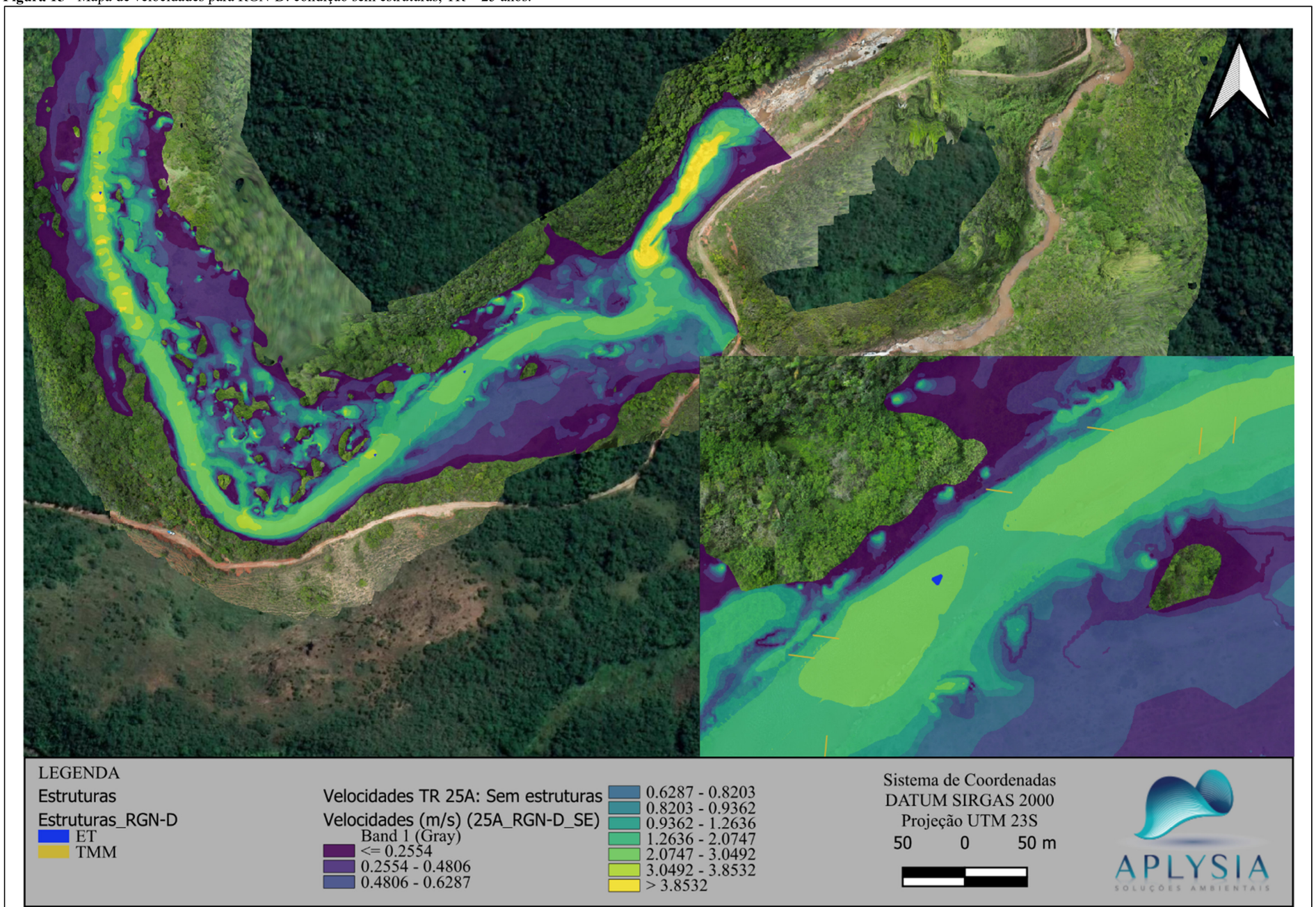
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 14 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



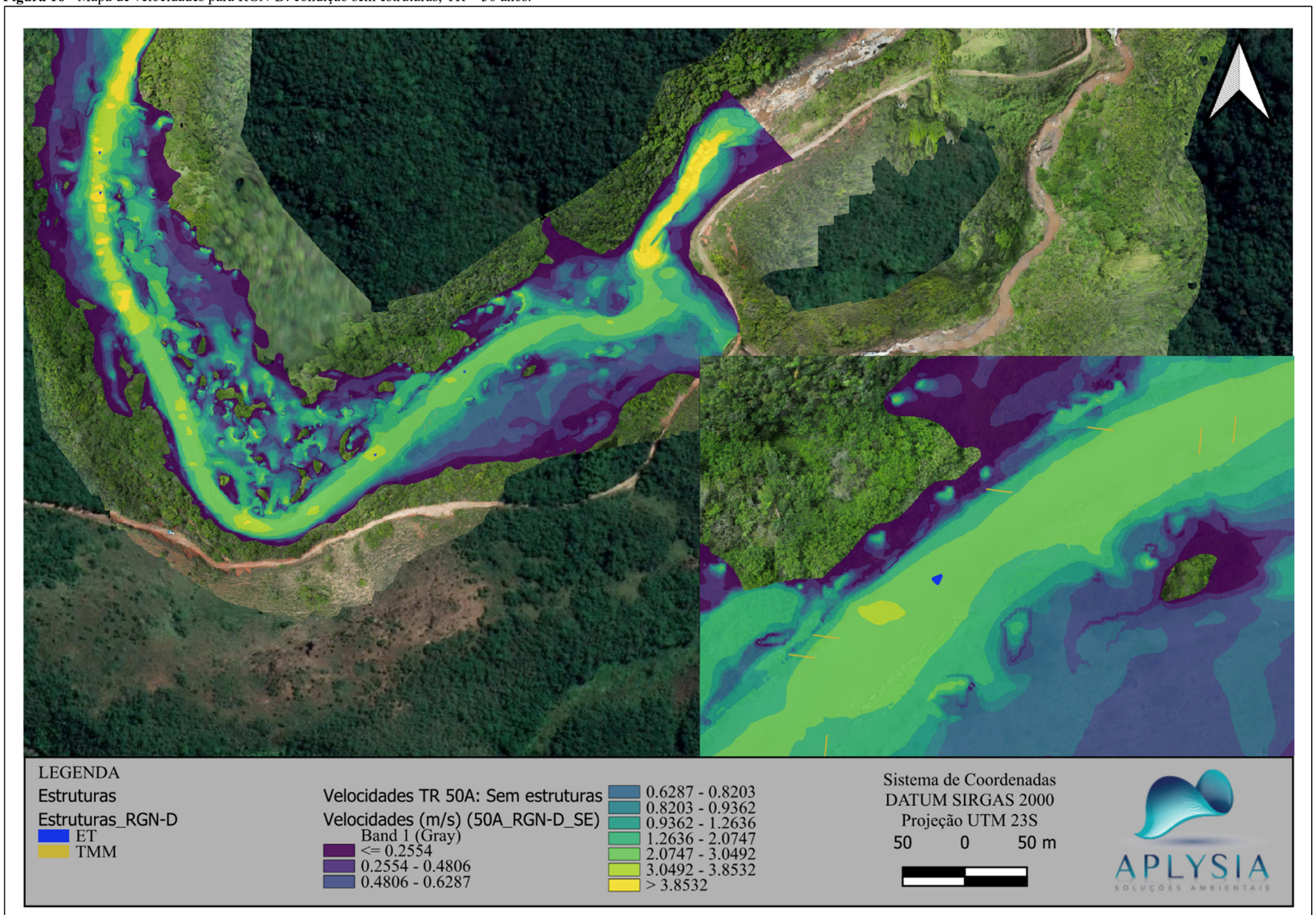
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 15 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



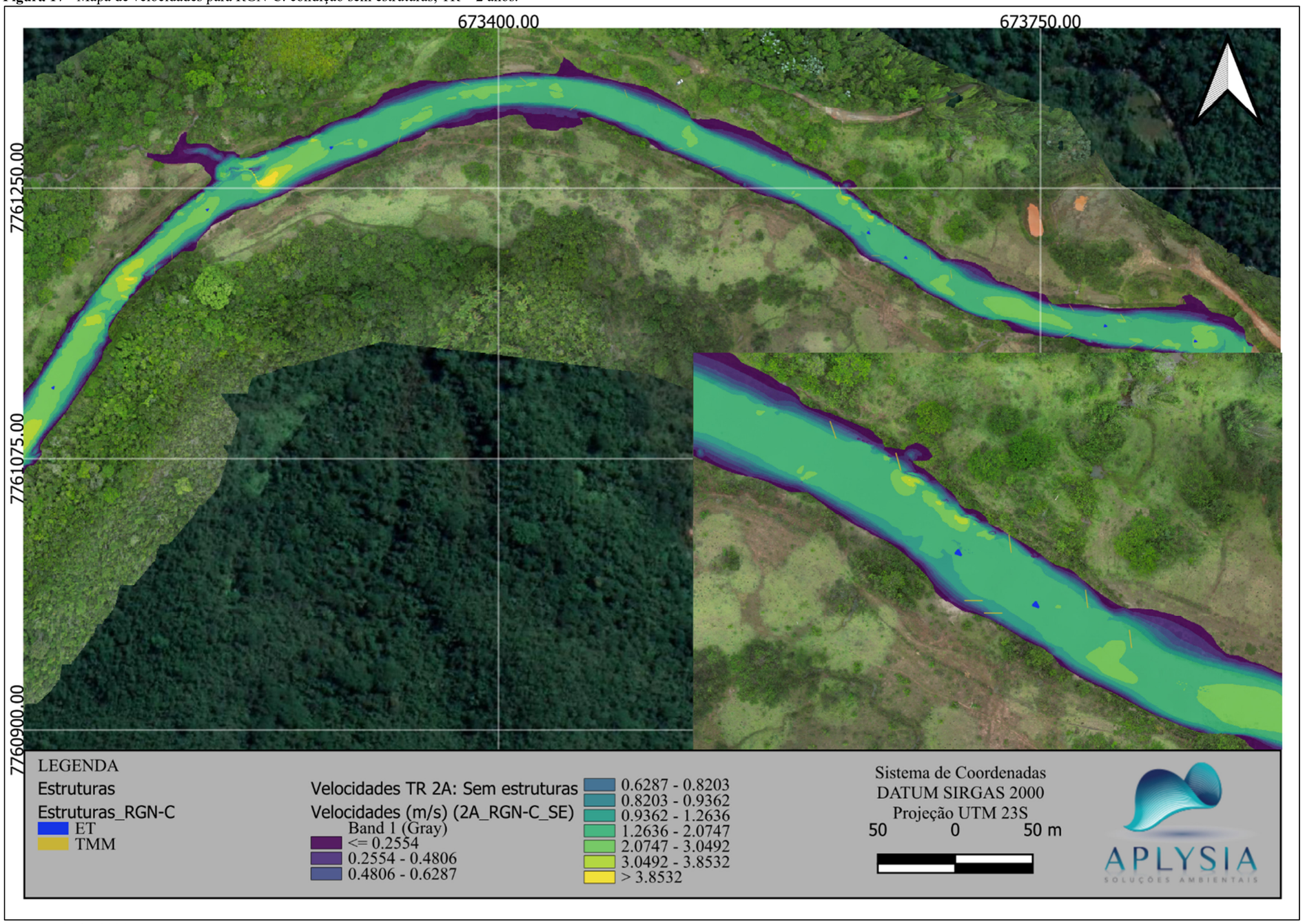
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 16 - Mapa de velocidades para RGN-D: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



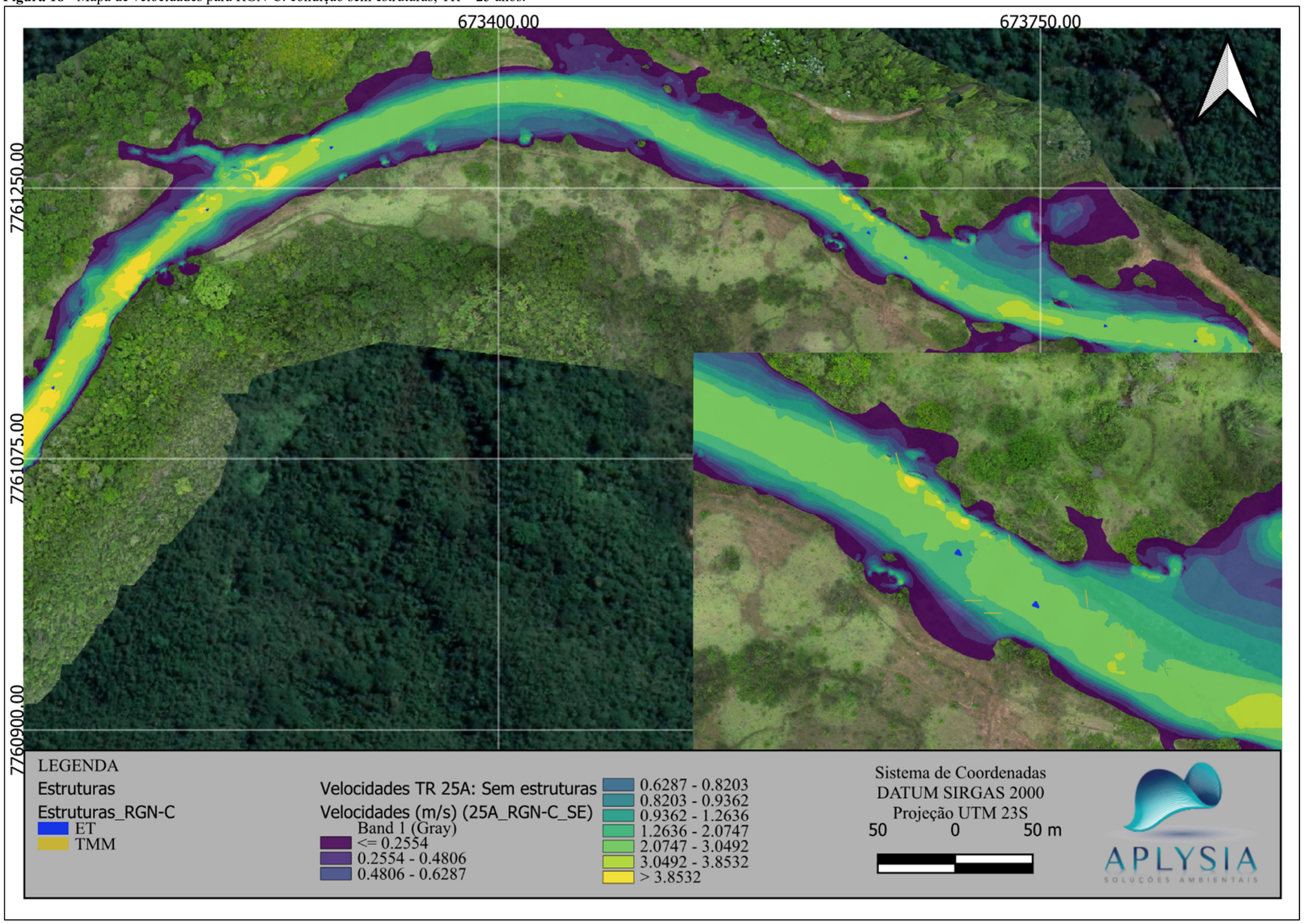
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 17 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



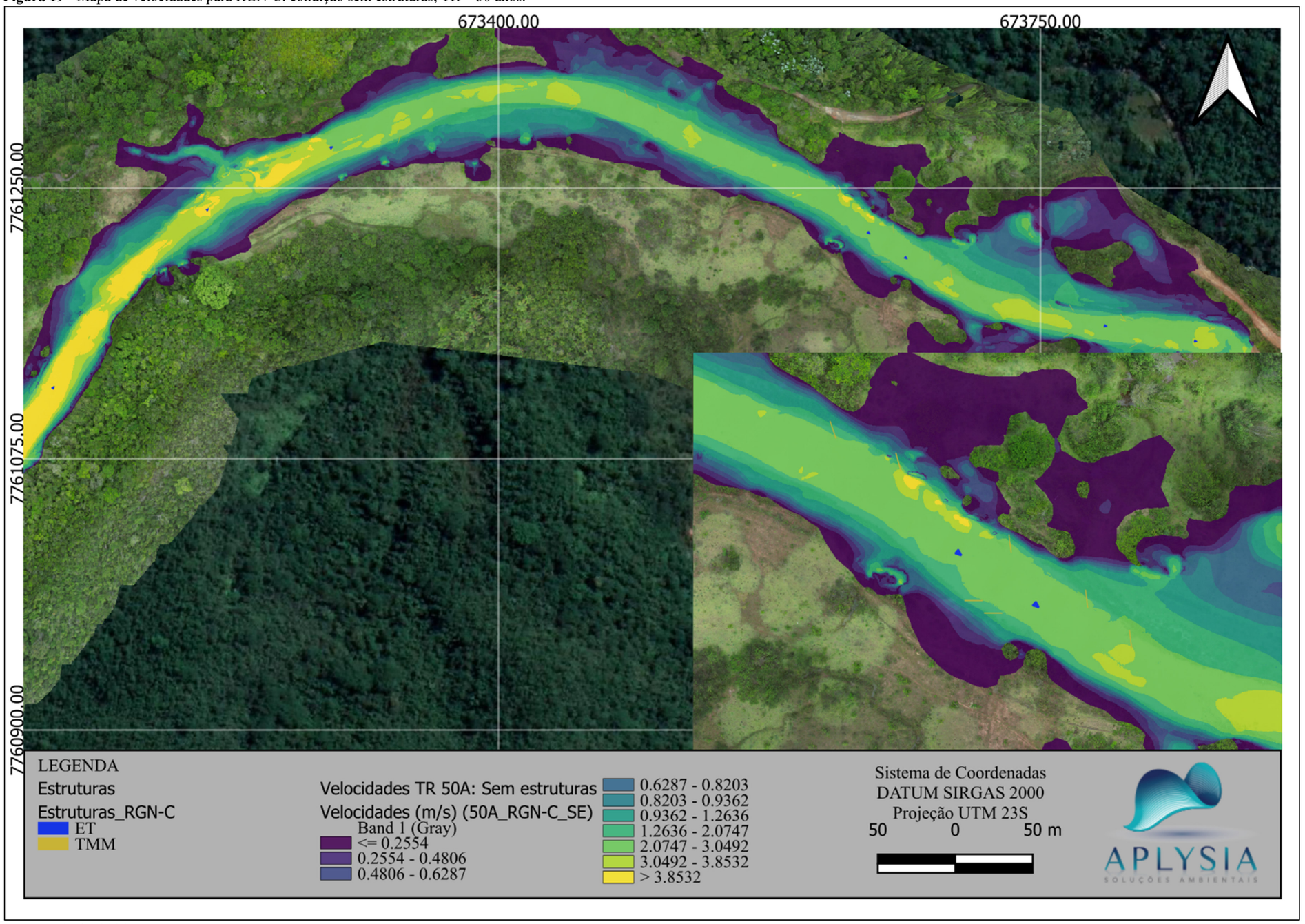
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 18 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



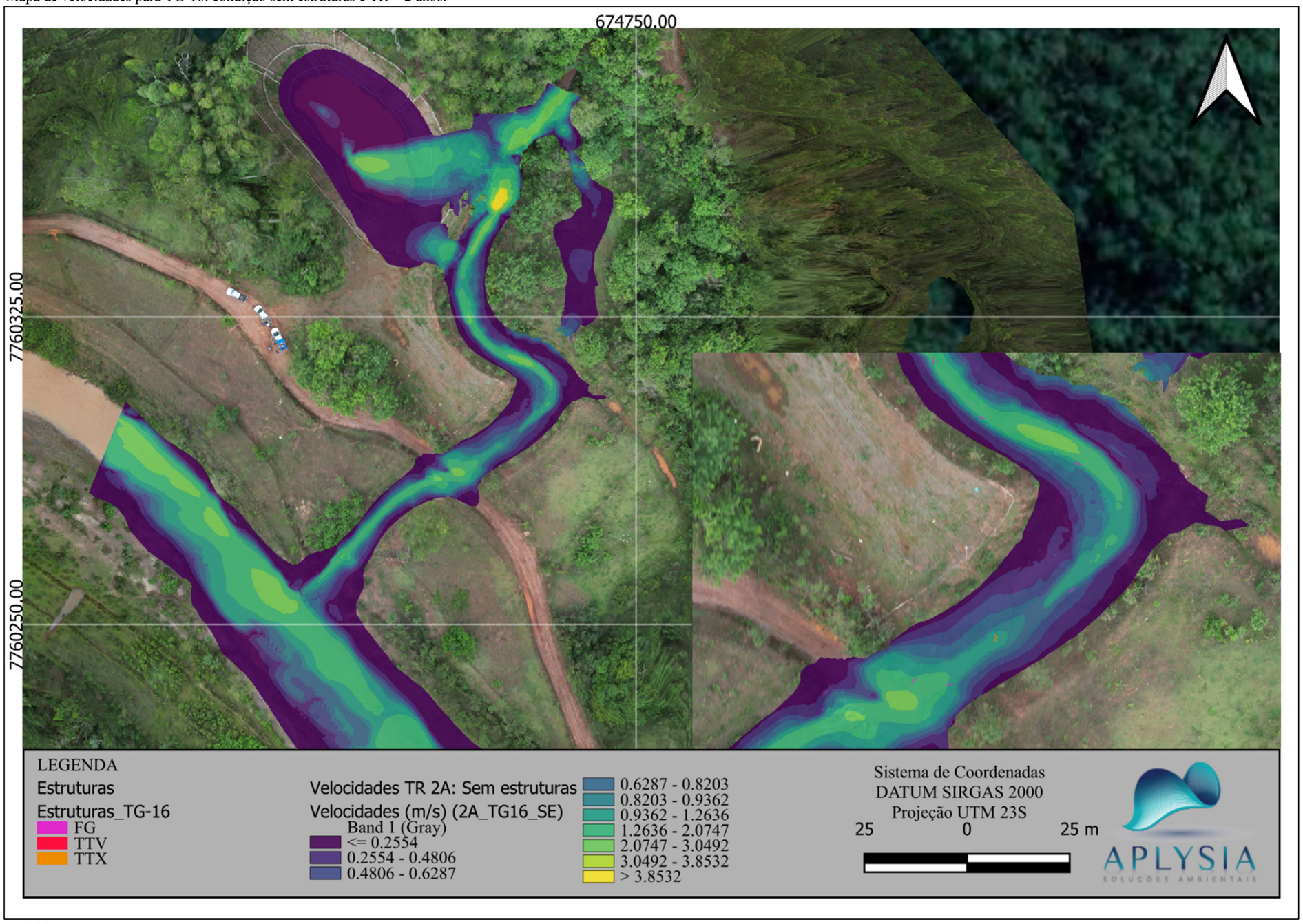
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 19 - Mapa de velocidades para RGN-C: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



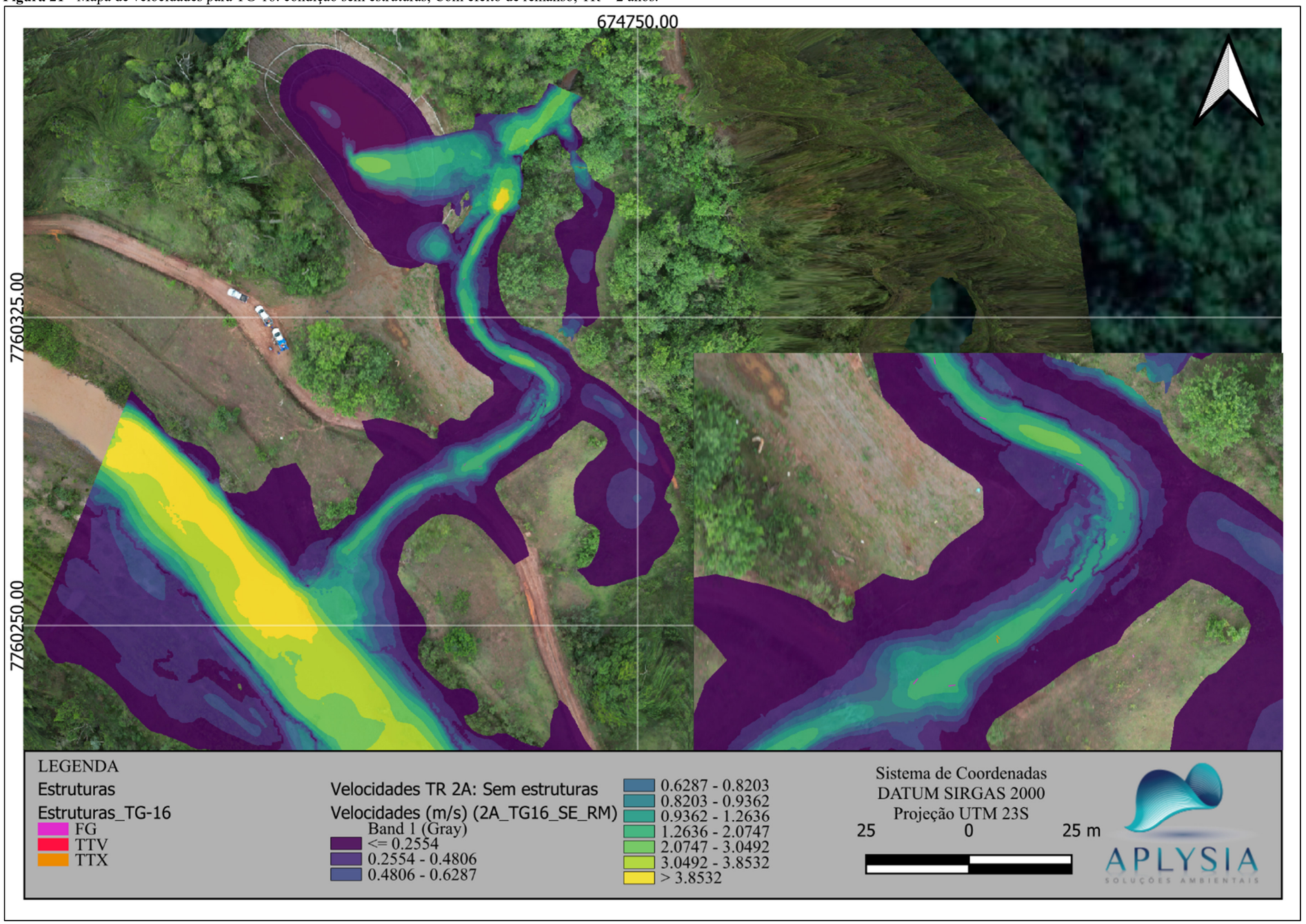
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 20 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas e TR = 2 anos.



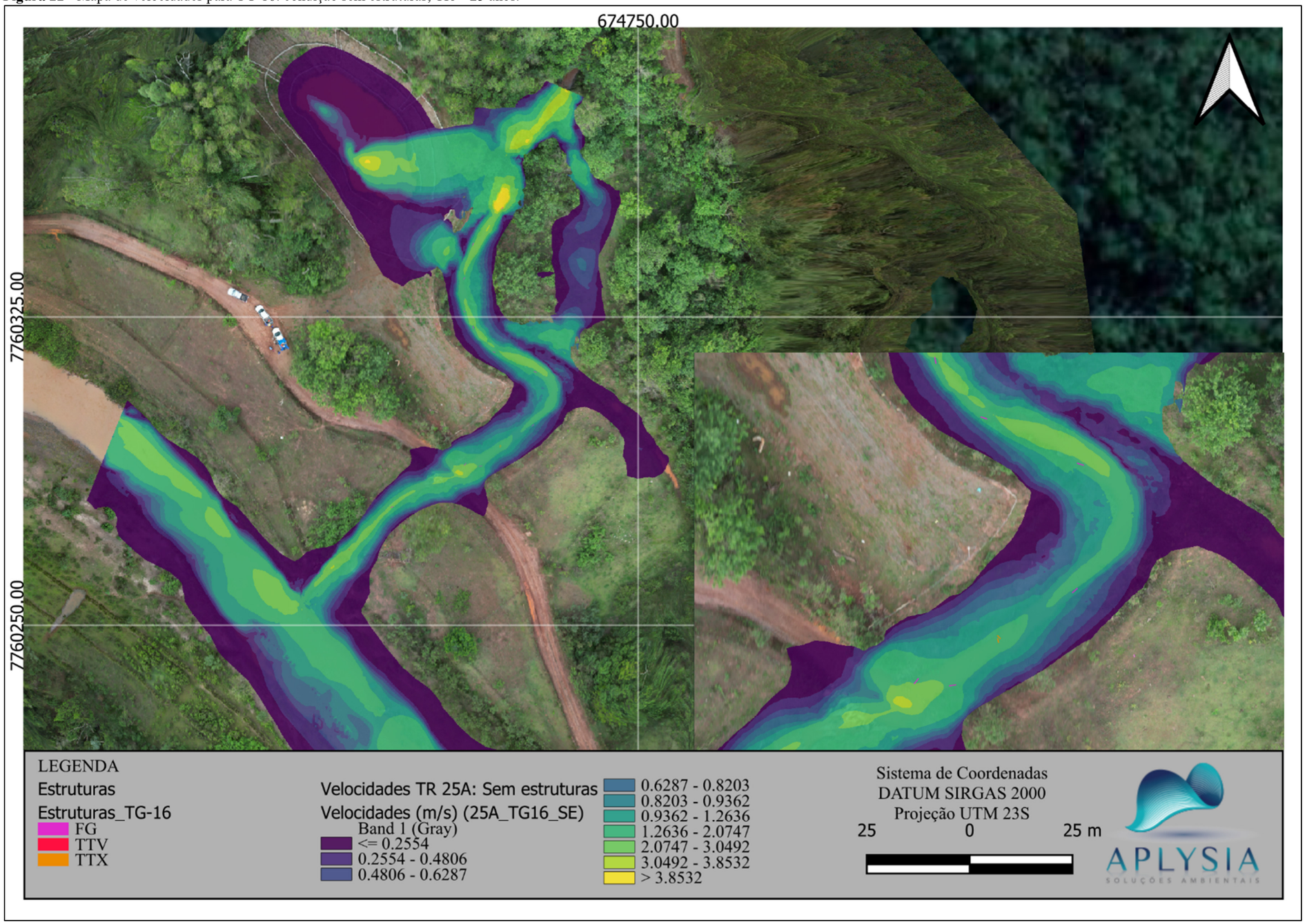
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 21 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



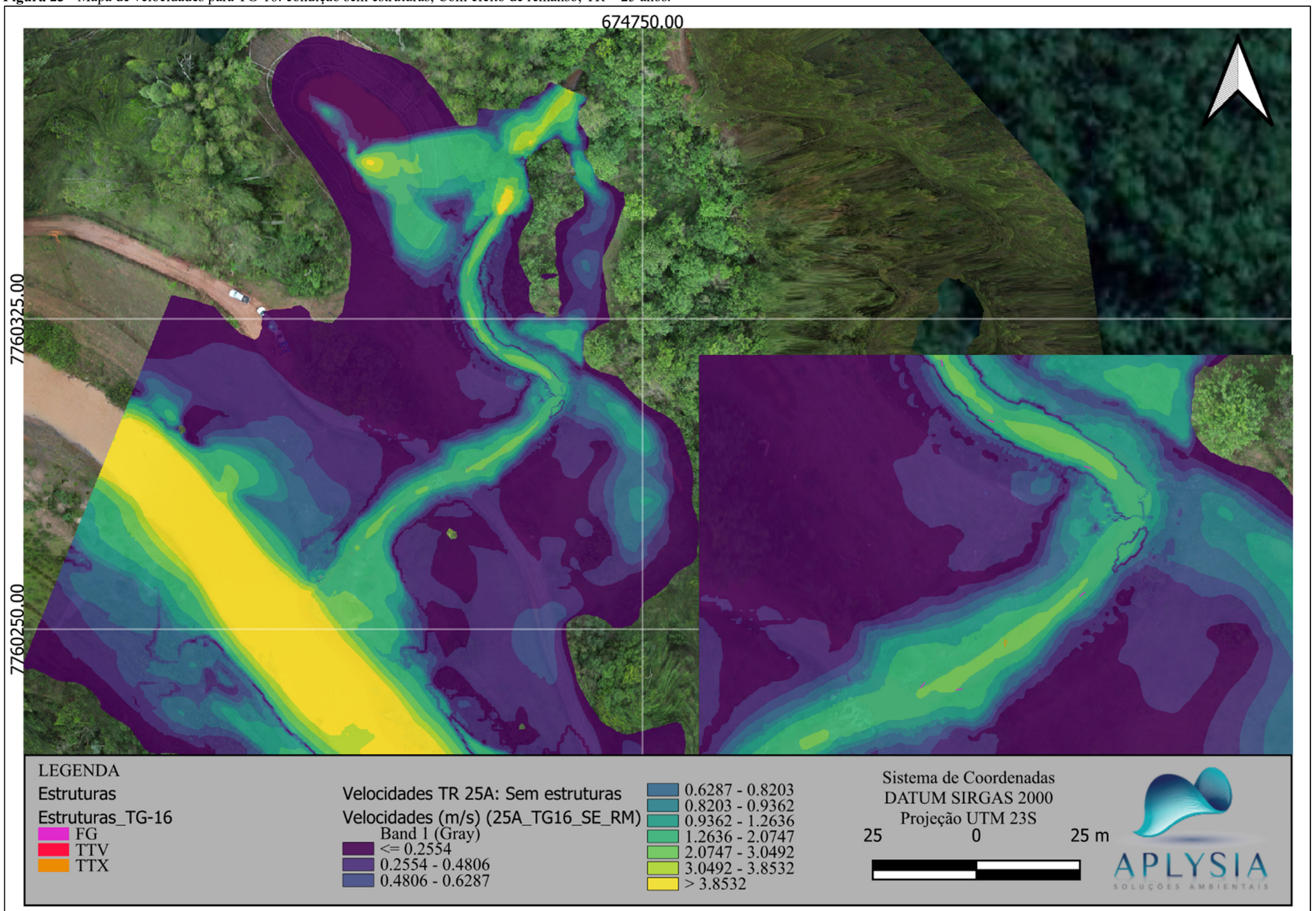
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 22 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



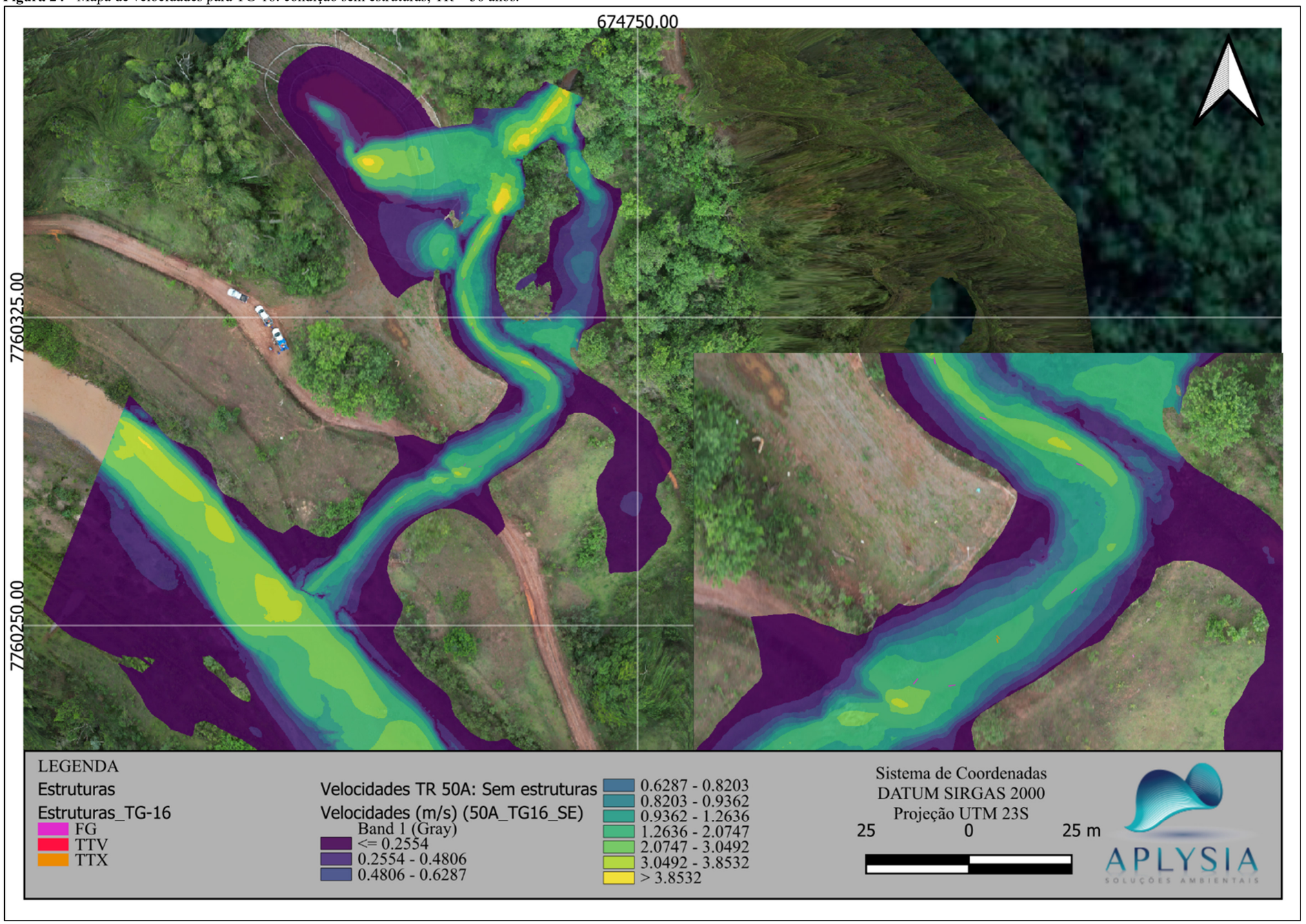
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 23 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



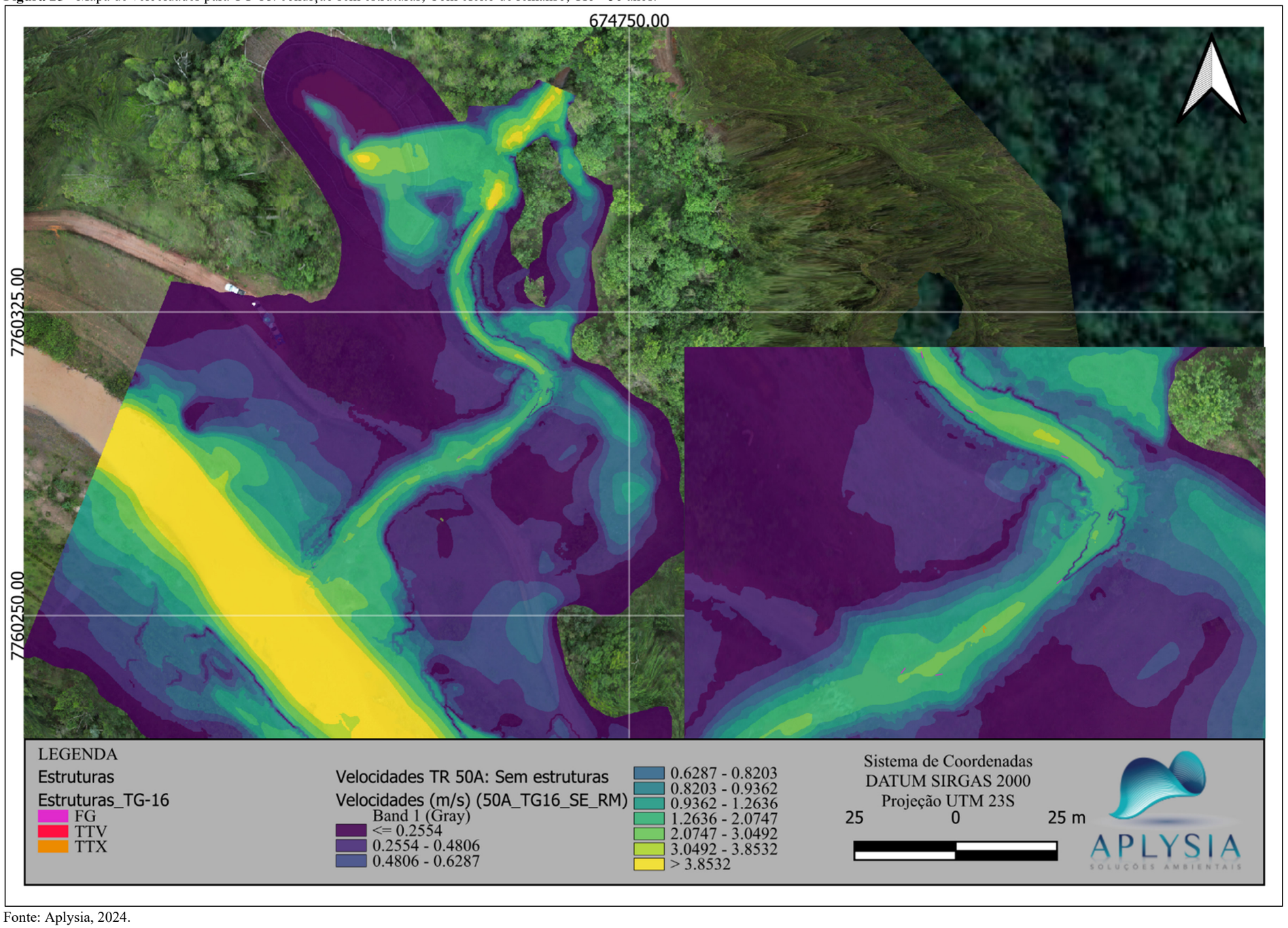
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 24 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



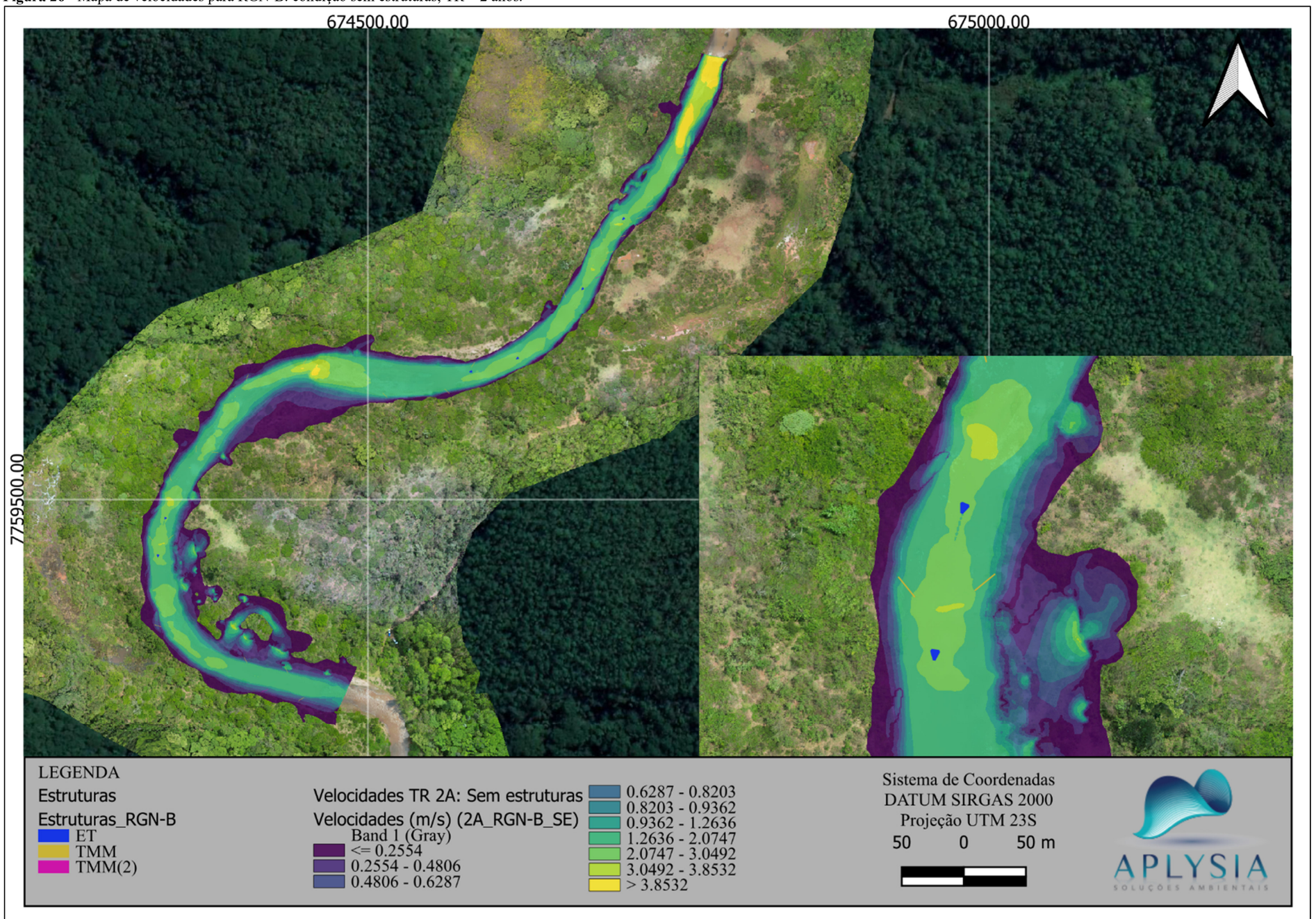
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 25 - Mapa de velocidades para TG-16: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



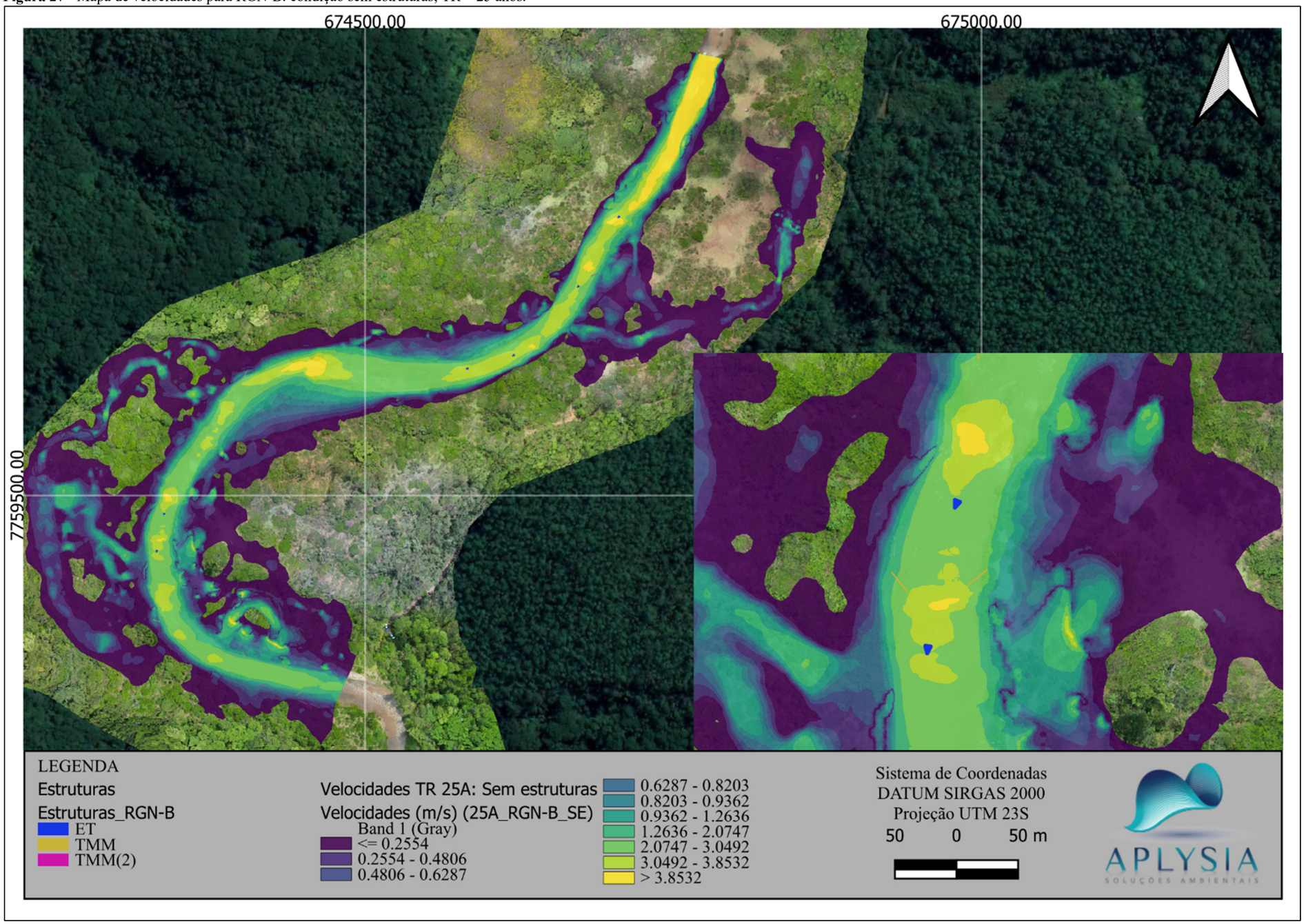
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 26 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



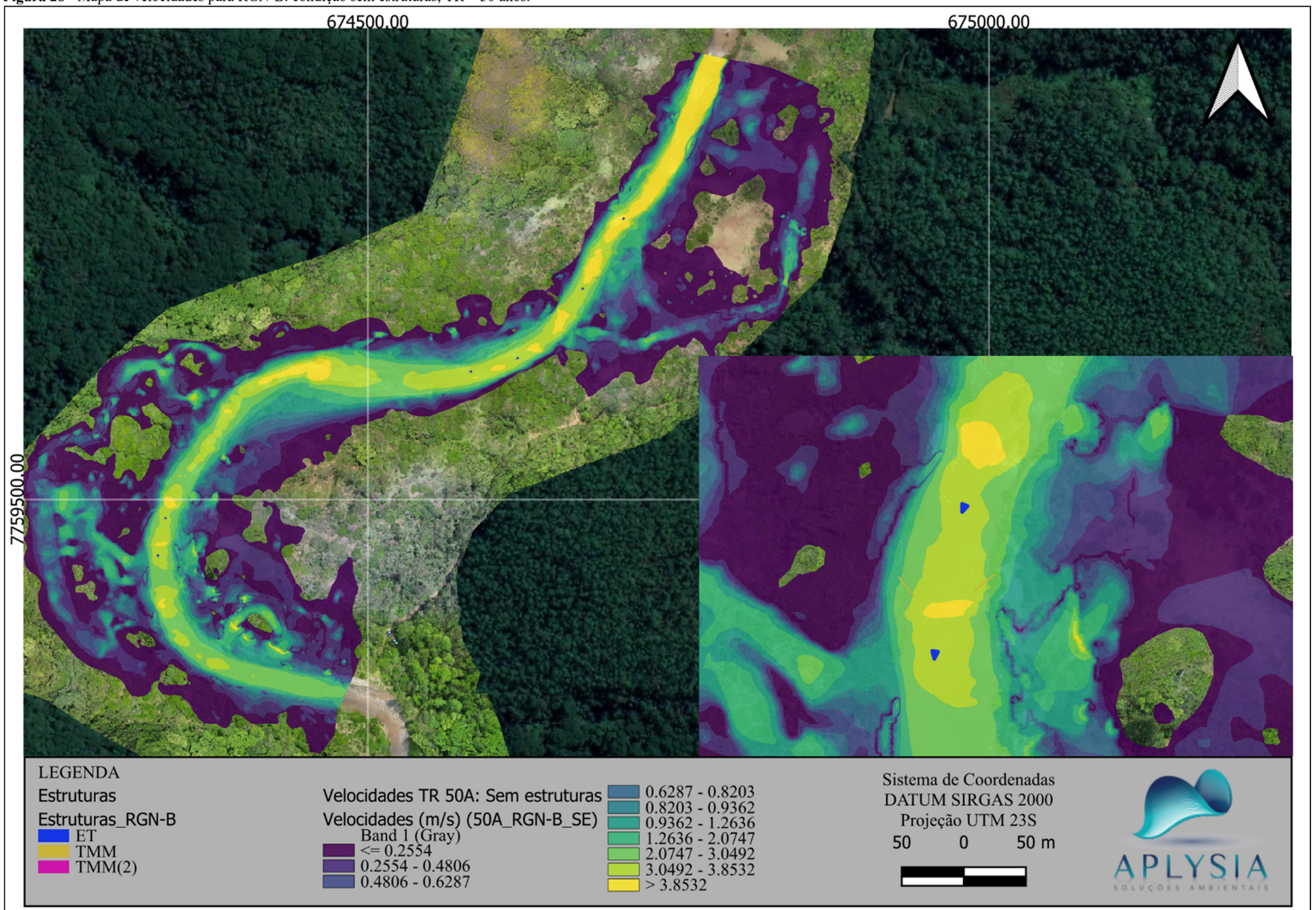
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 27 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



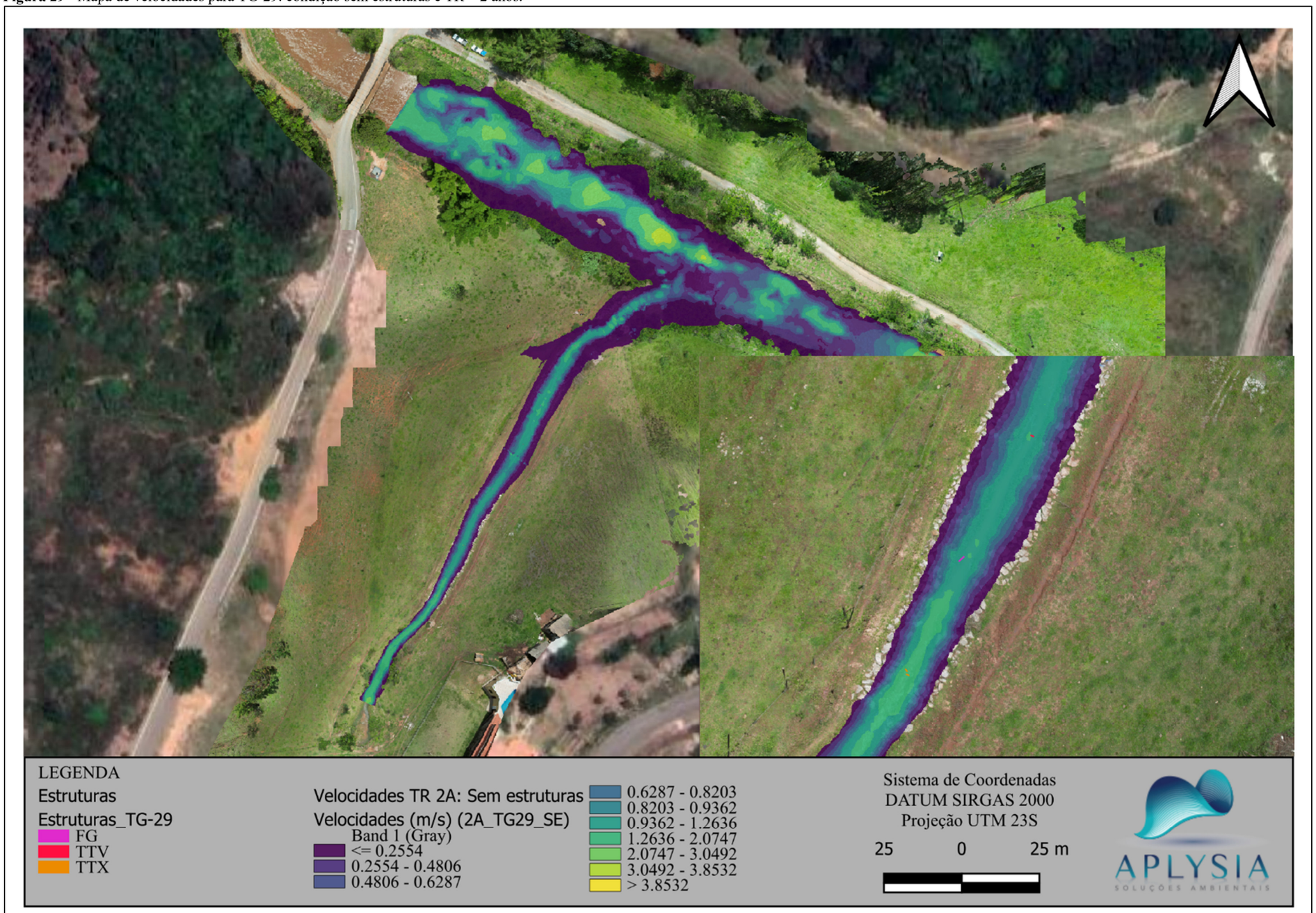
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 28 - Mapa de velocidades para RGN-B: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



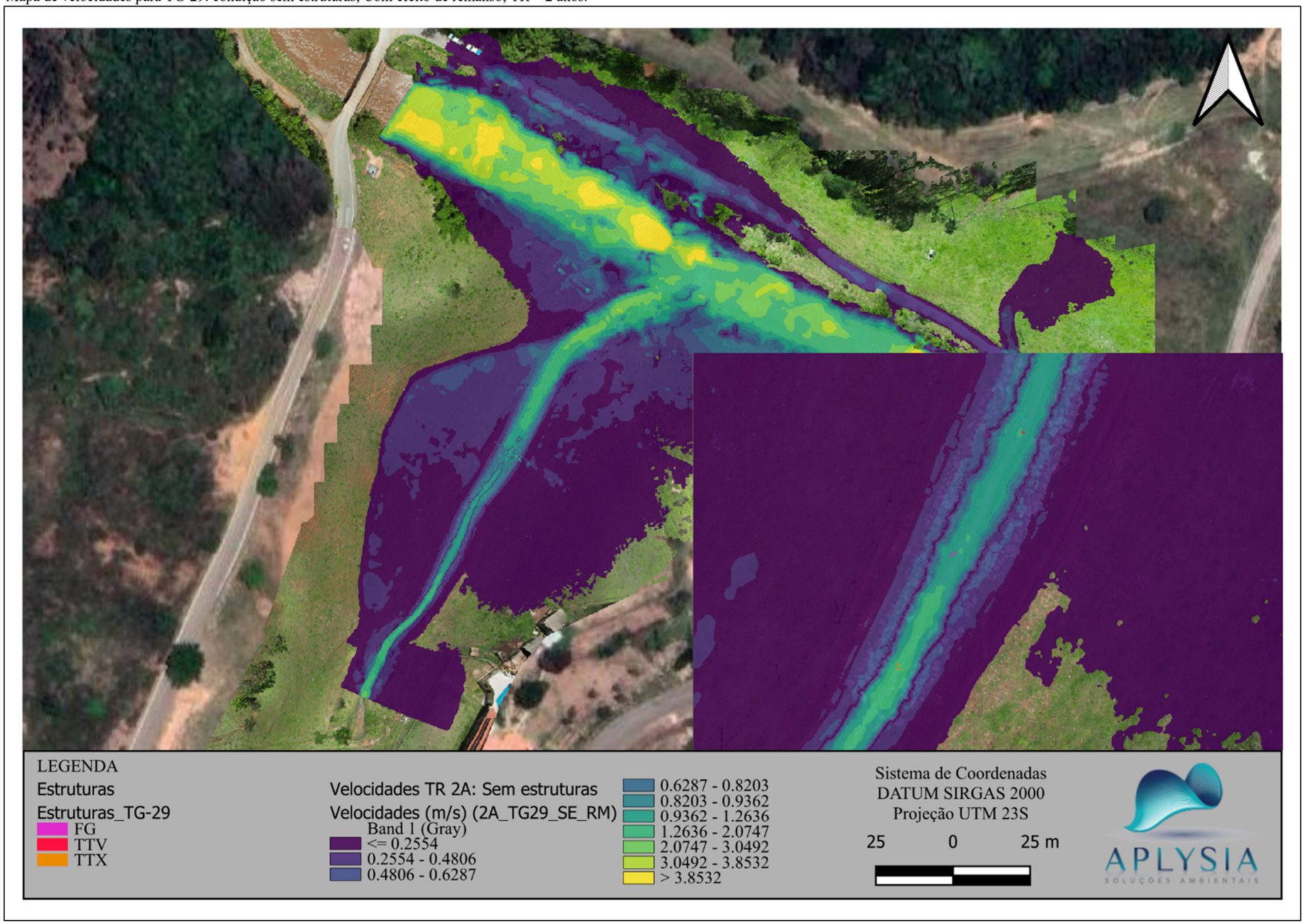
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 29 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas e TR = 2 anos.



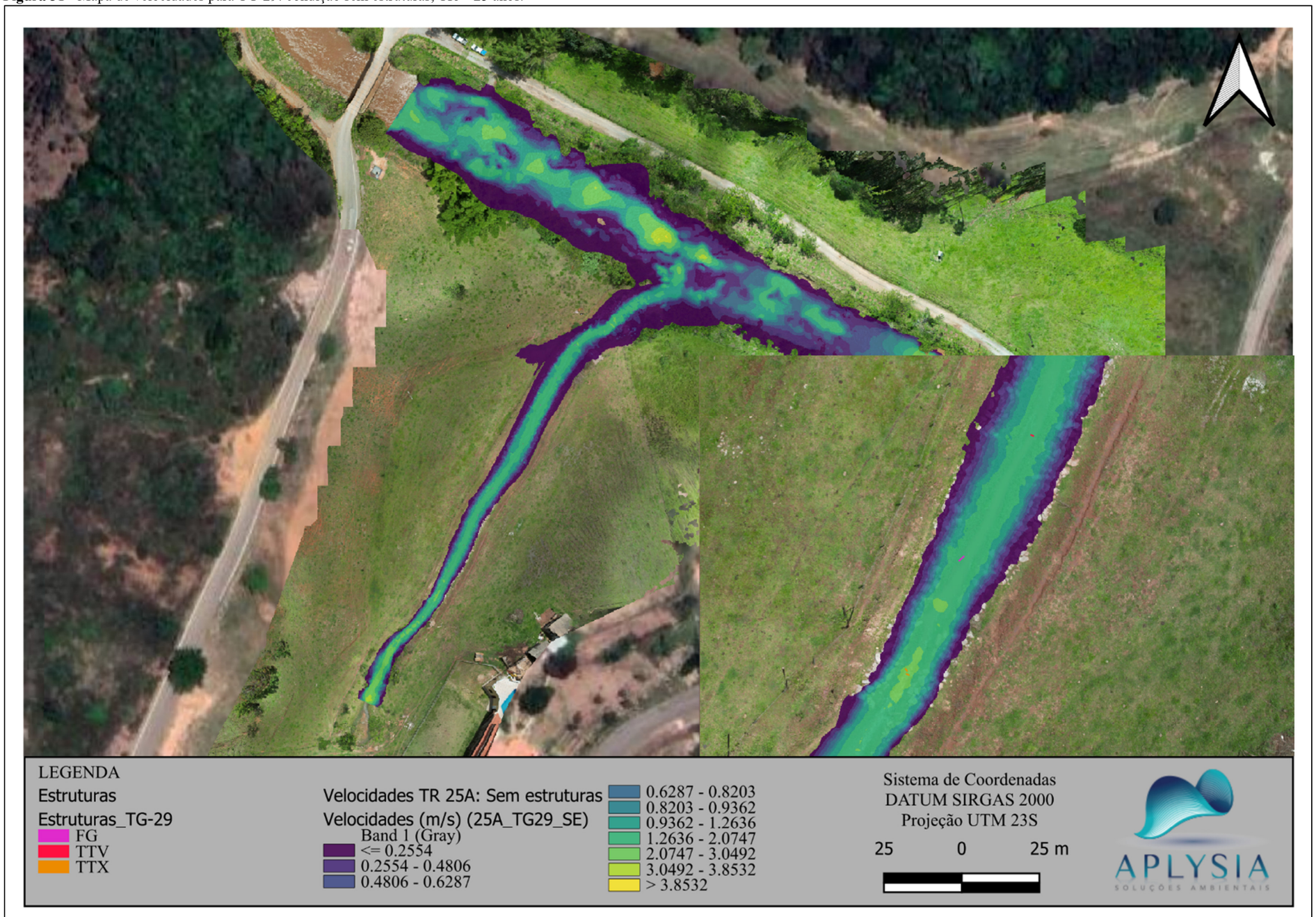
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 30 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 2 anos.



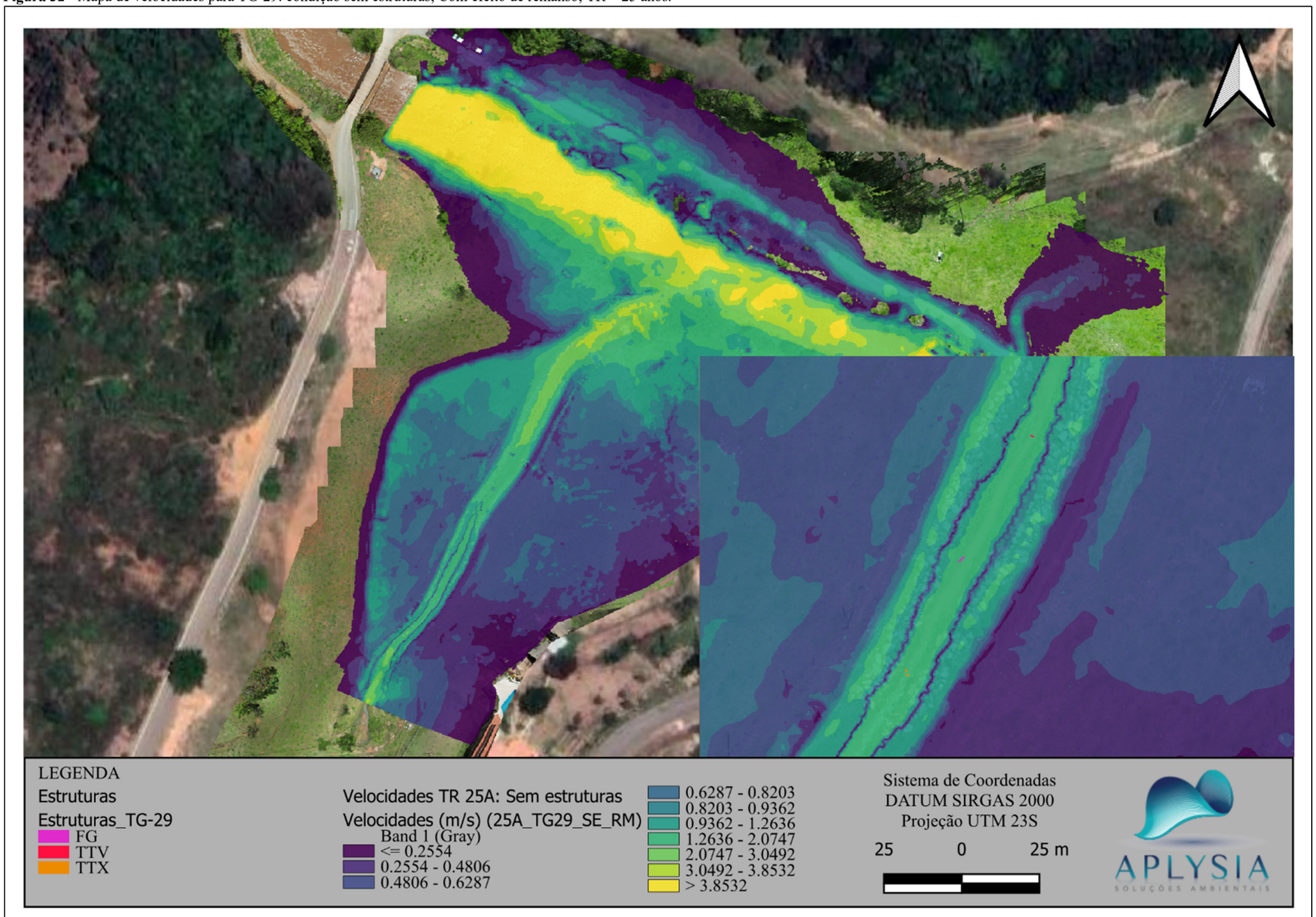
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 31 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



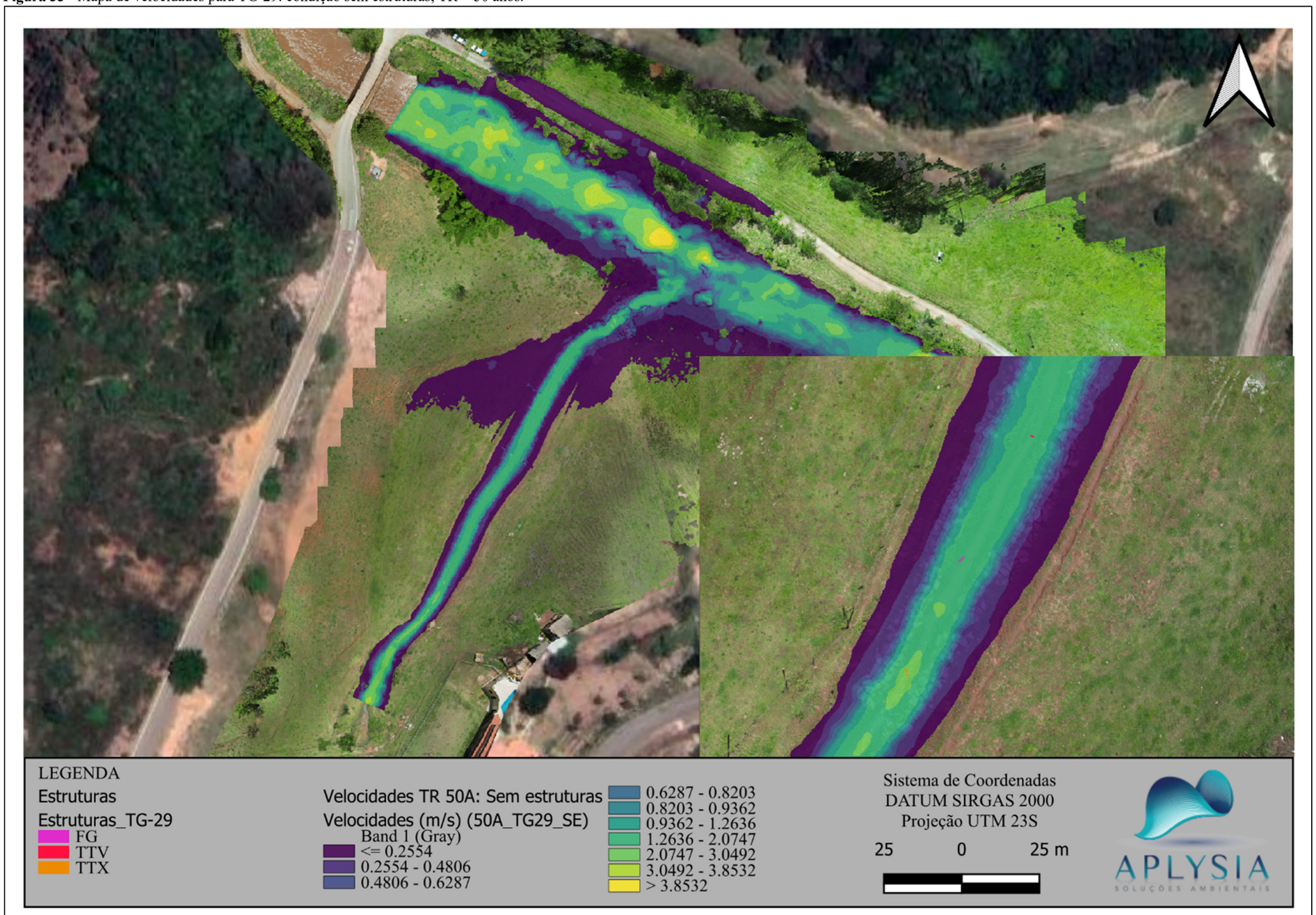
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 32 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 25 anos.



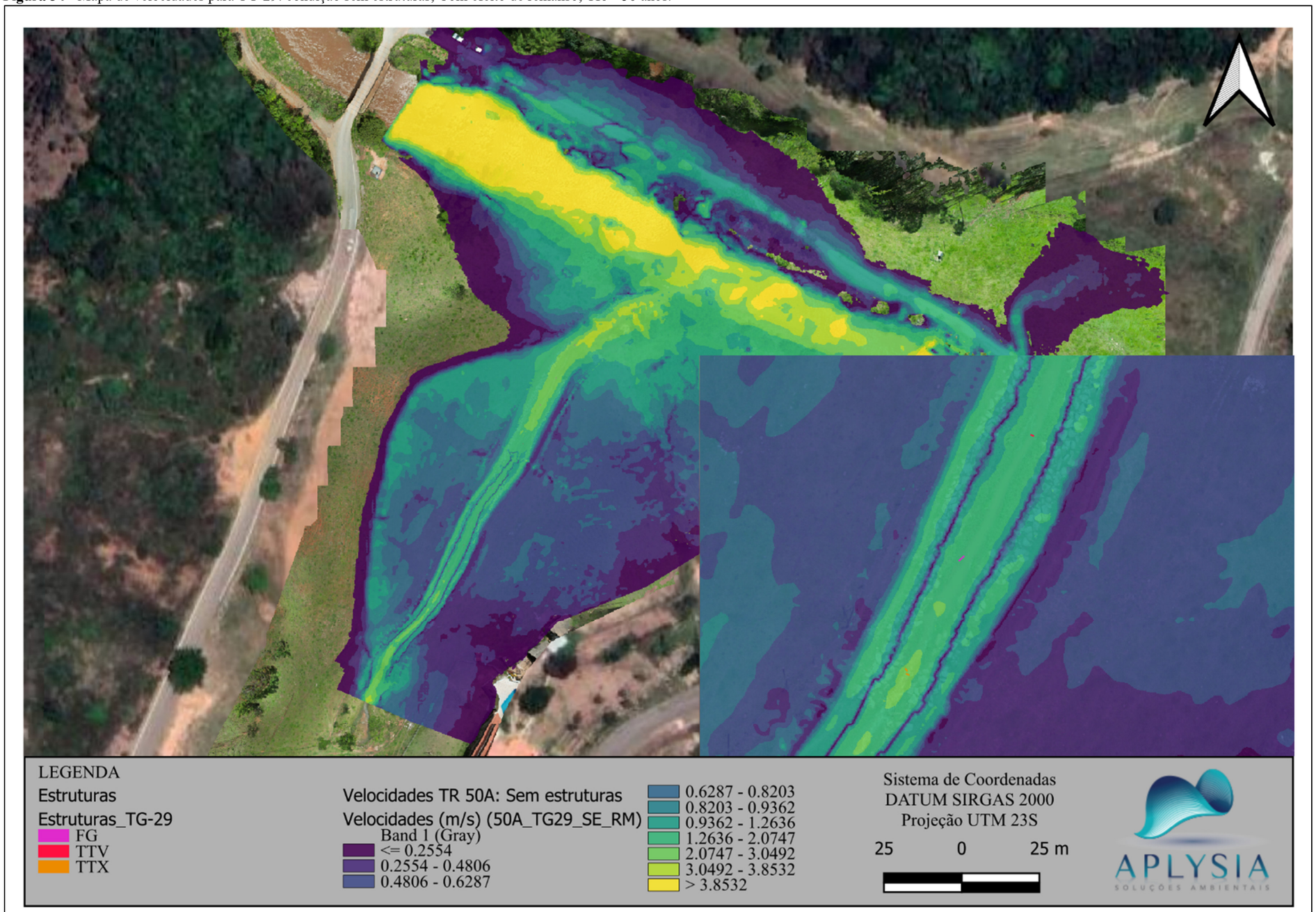
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 33 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



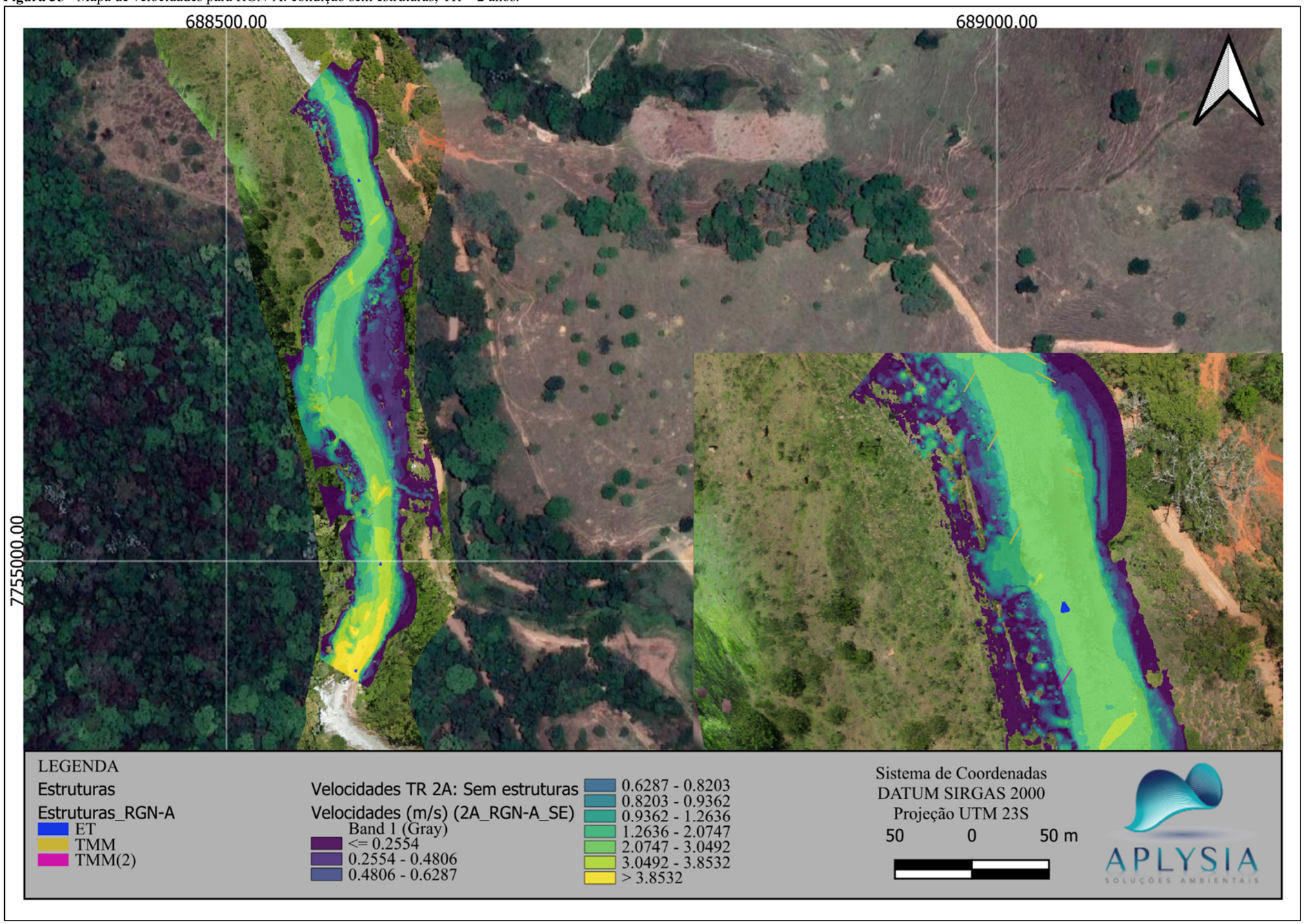
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 34 - Mapa de velocidades para TG-29: condição sem estruturas; Com efeito de remanso; TR = 50 anos.



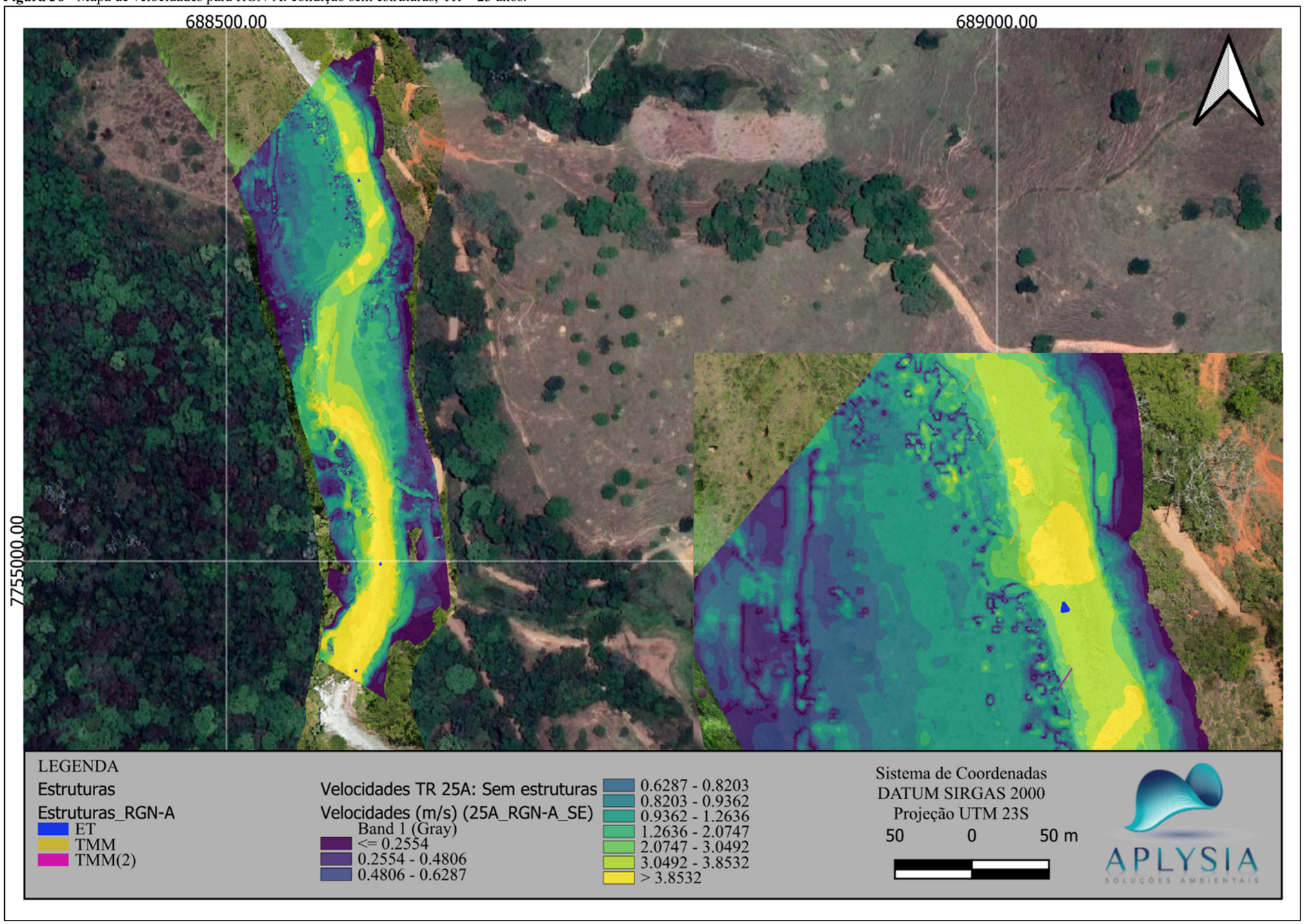
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 35 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 2 anos.



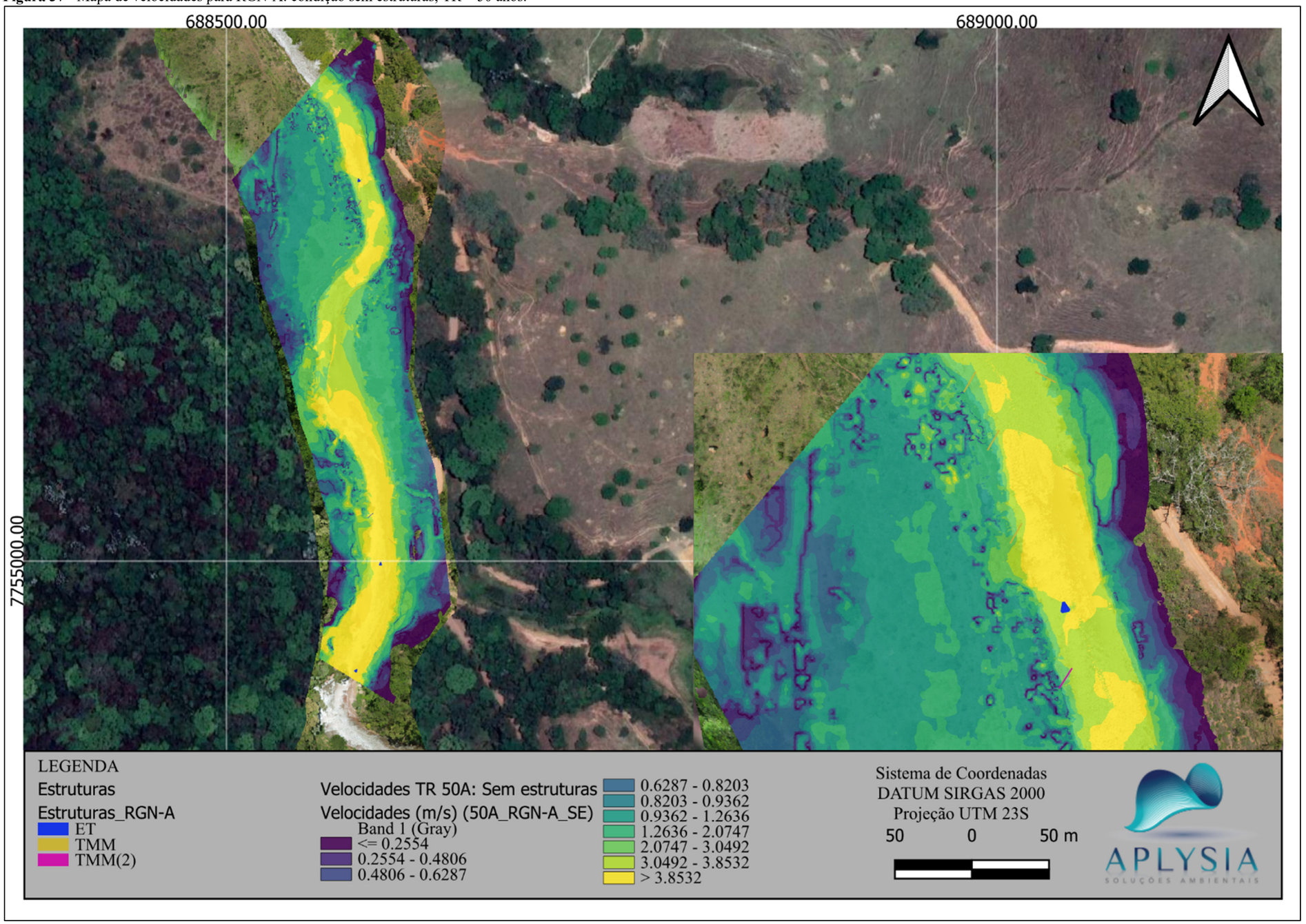
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 36 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 25 anos.



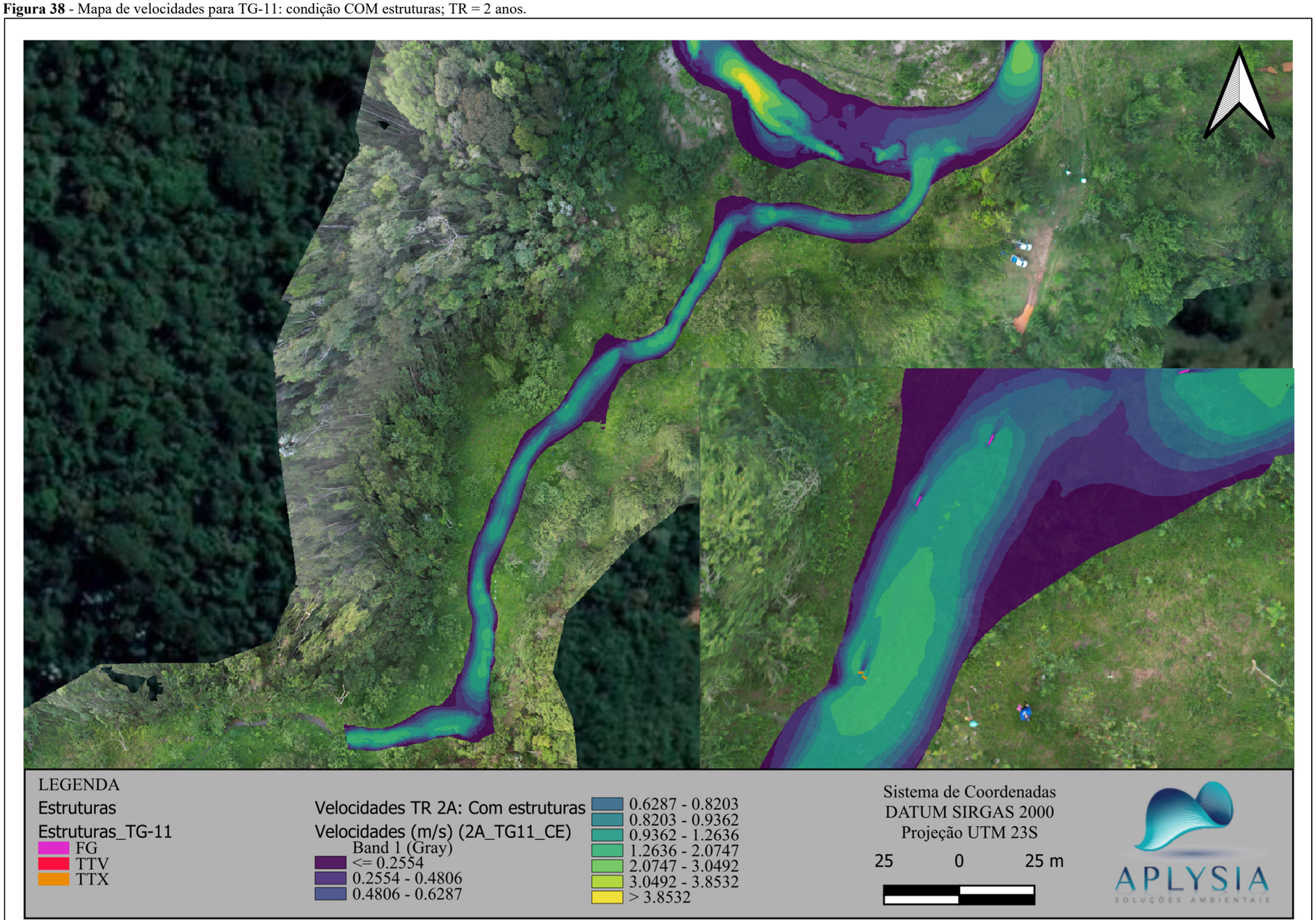
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 37 - Mapa de velocidades para RGN-A: condição sem estruturas; TR = 50 anos.



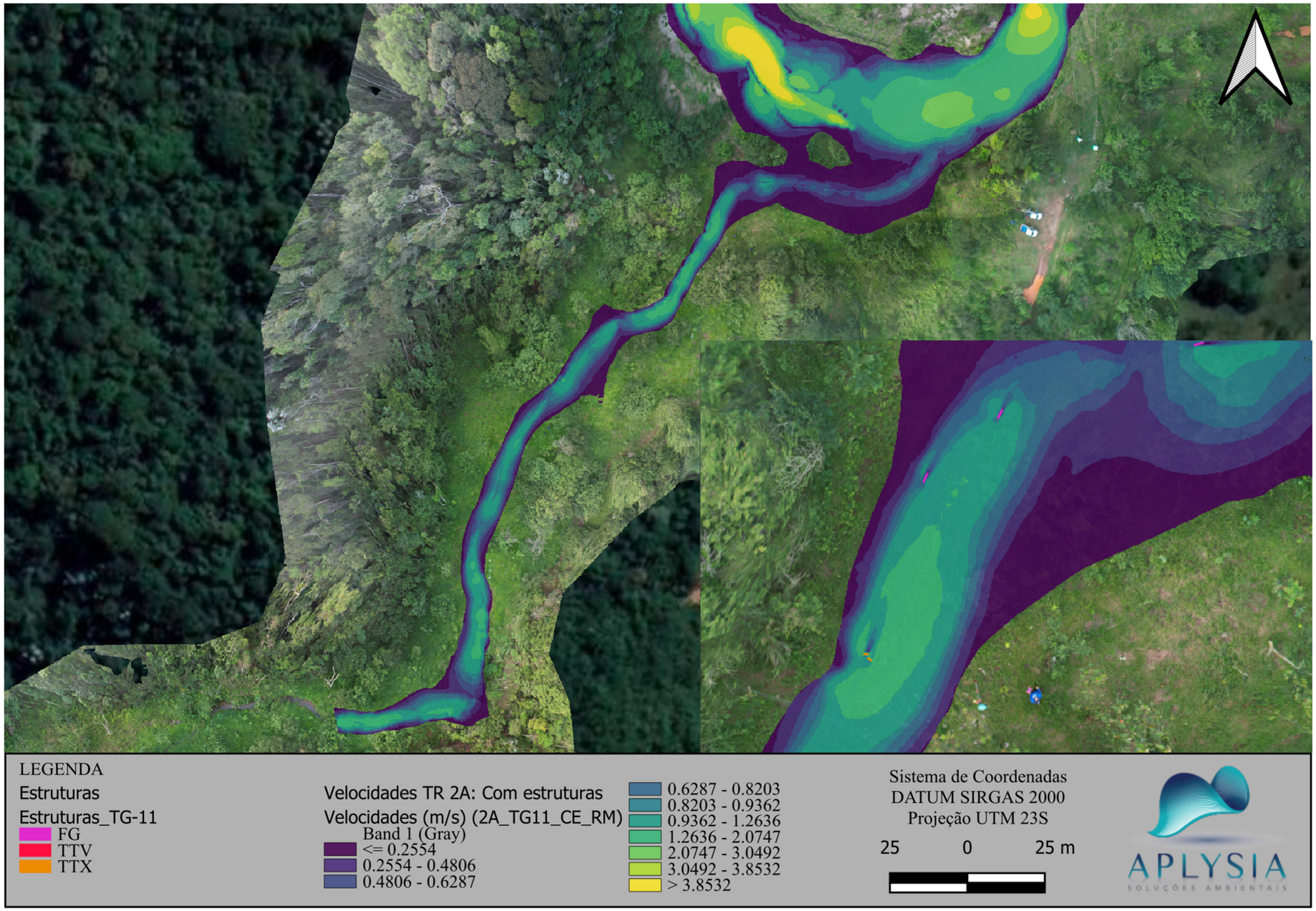
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 38 - Mapa de velocidades para TG-11: condição COM estruturas; TR = 2 anos.



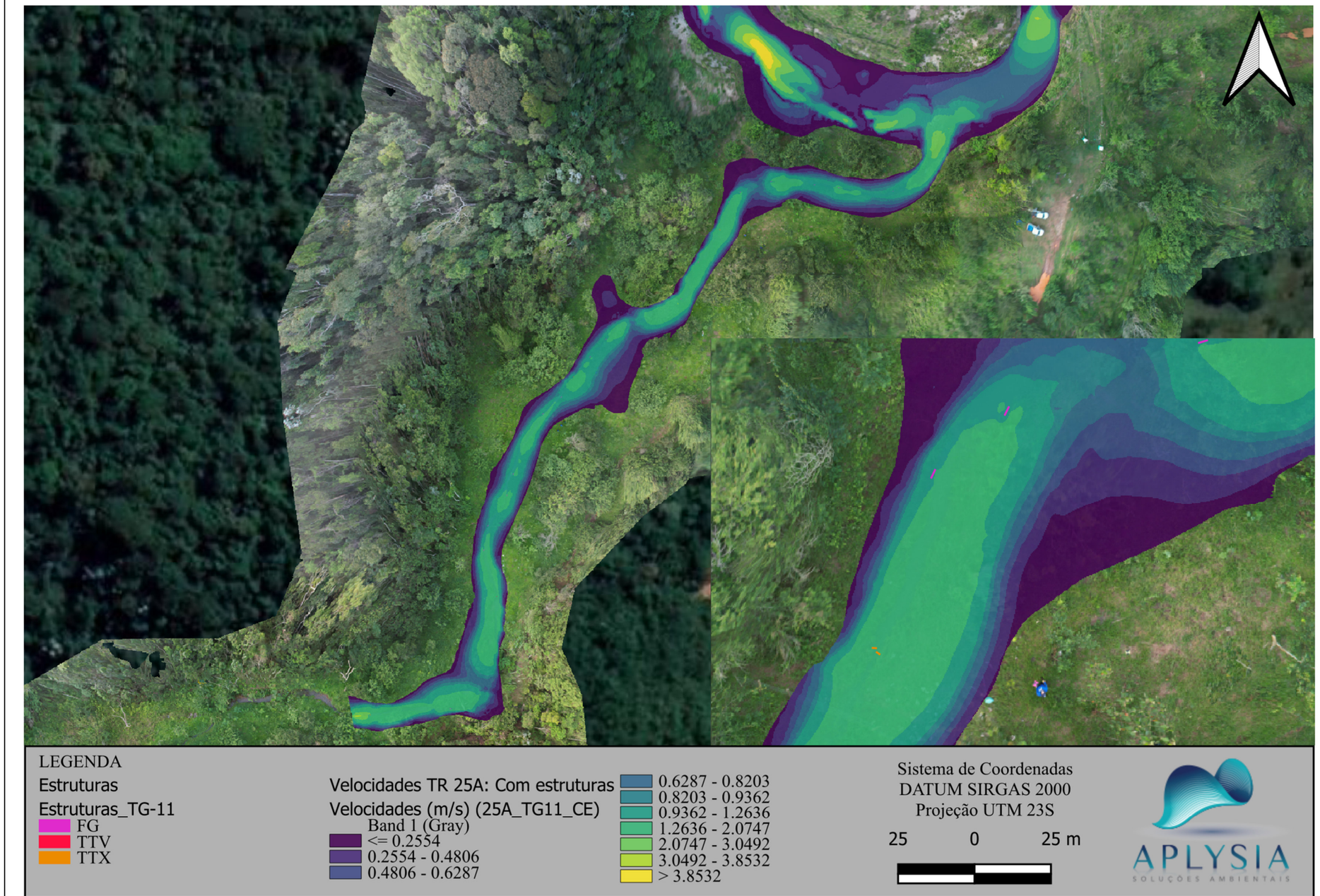
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 39 - Mapa de velocidades para **TG-11**: condição **COM** estruturas; Com efeito de Remanso; TR = **2** anos.



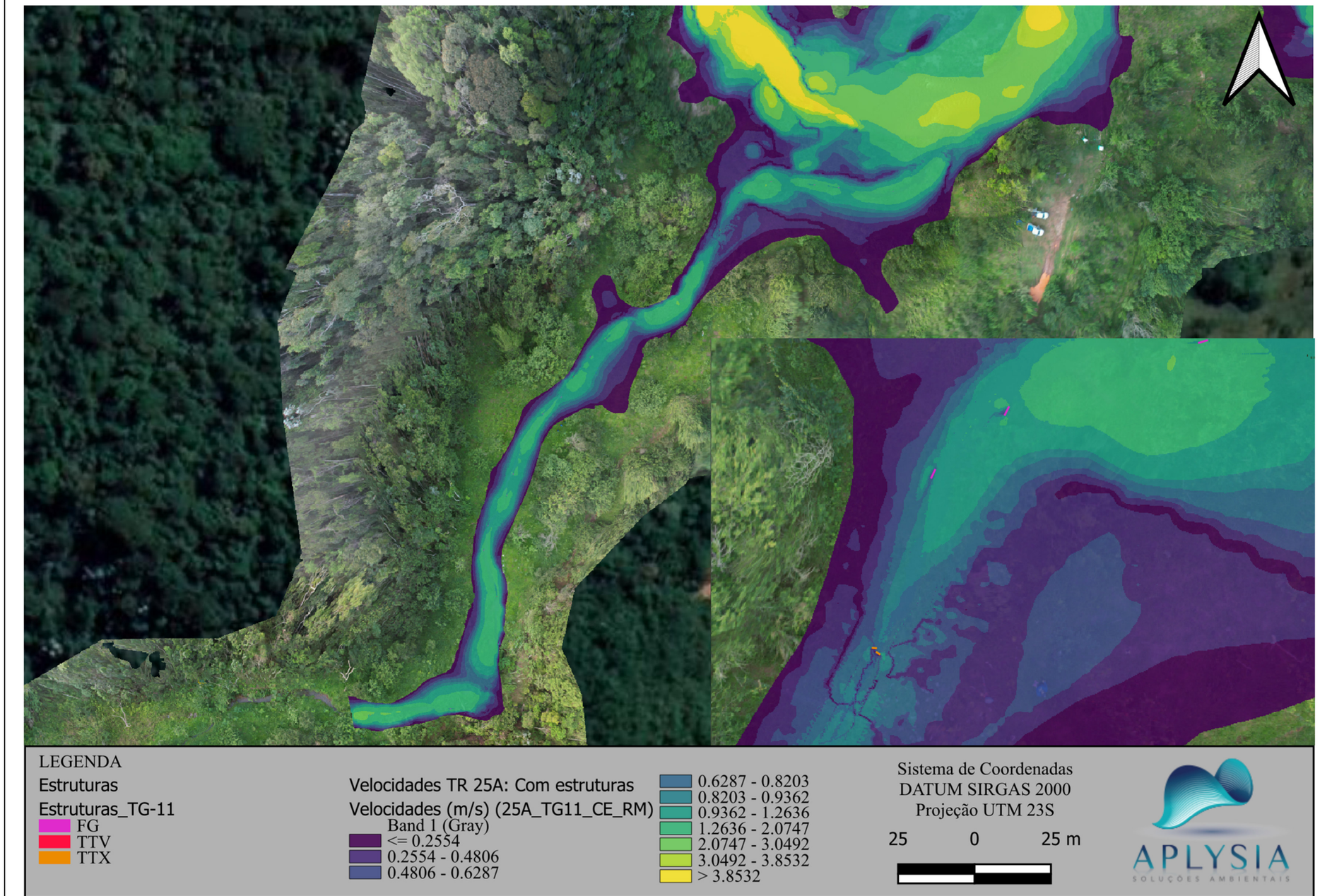
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 40 - Mapa de velocidades para **TG-11**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



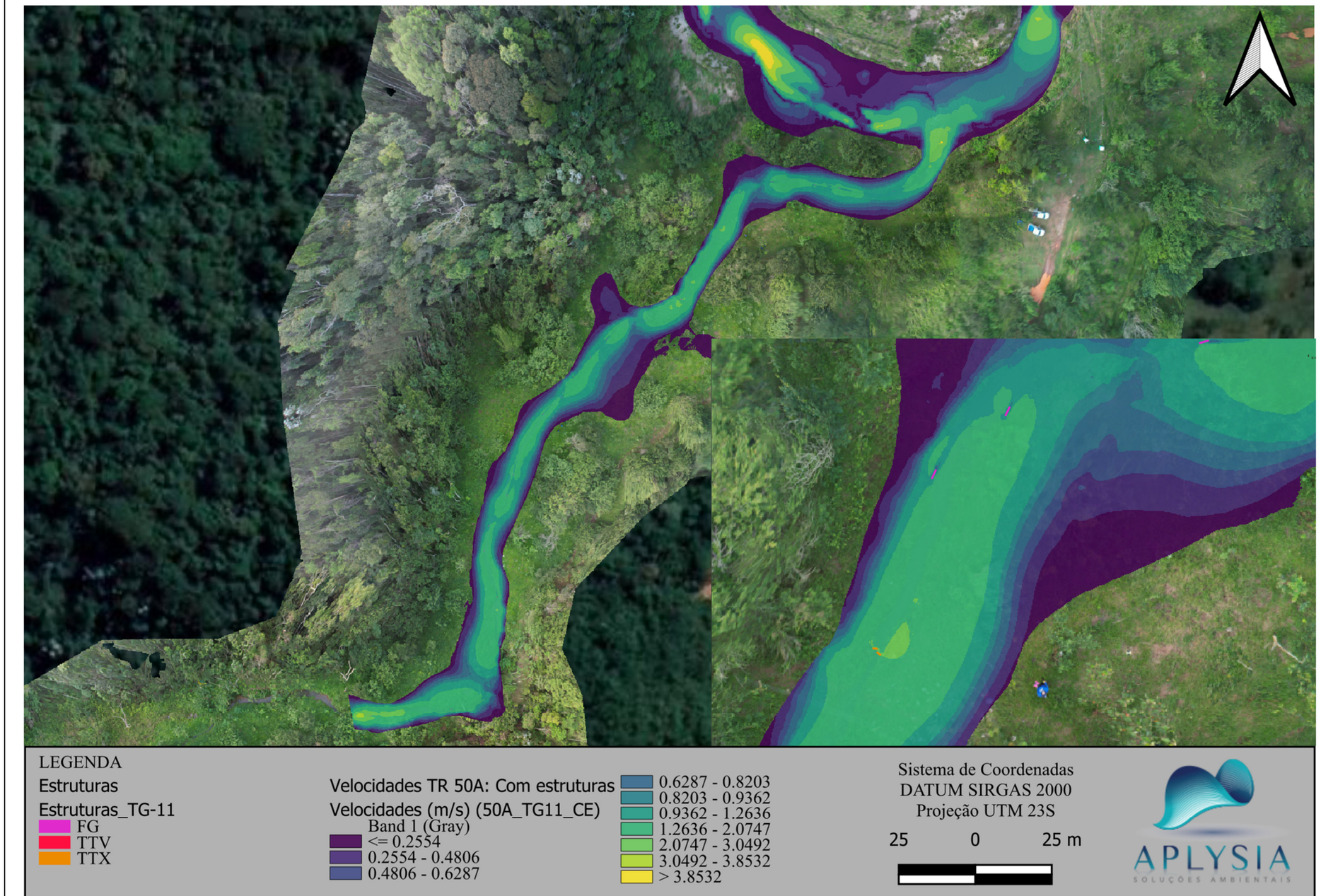
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 41 - Mapa de velocidades para **TG-11**: condição **COM** estruturas; Com efeito de Remanso; TR = **25** anos.



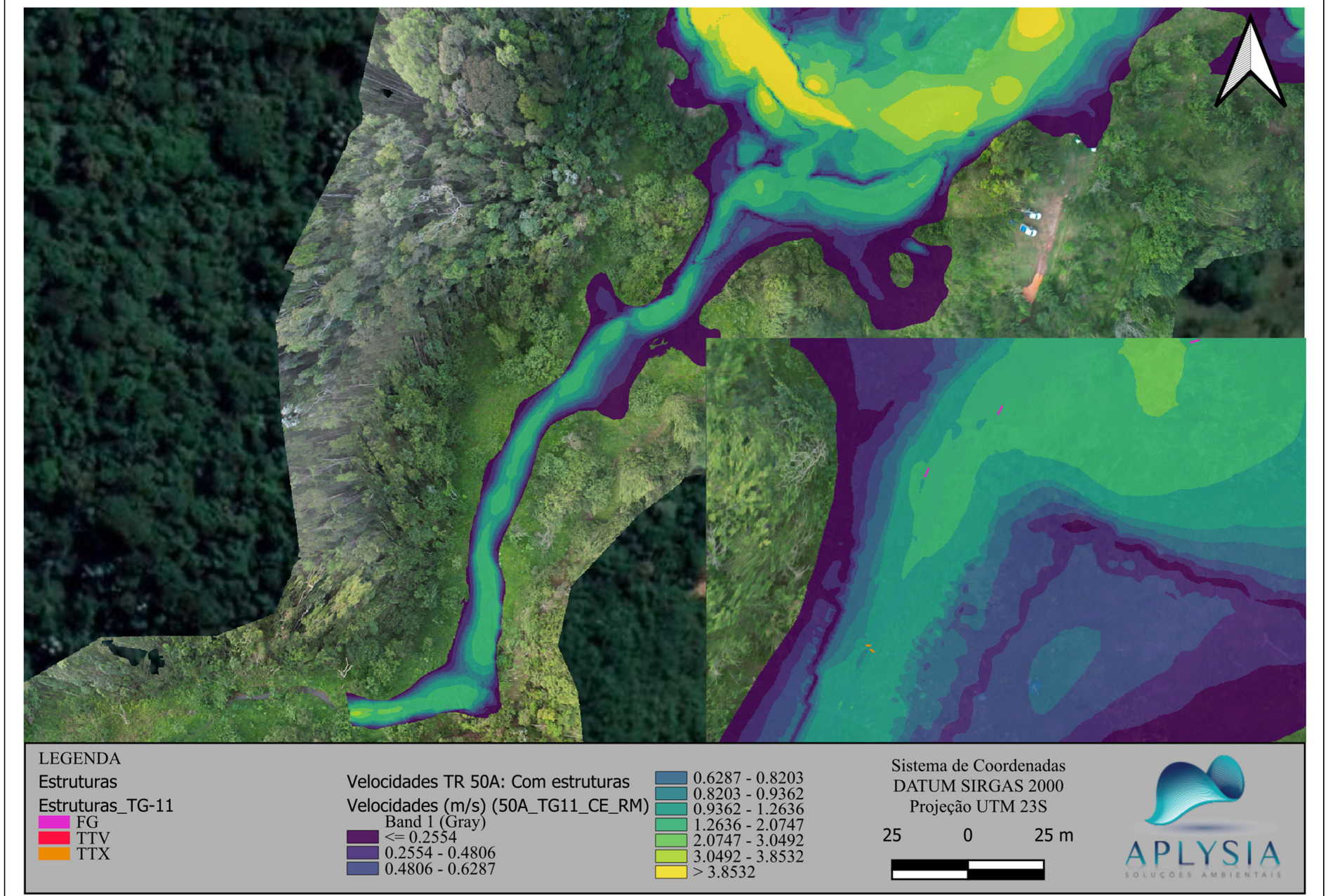
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 42 - Mapa de velocidades para **TG-11**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



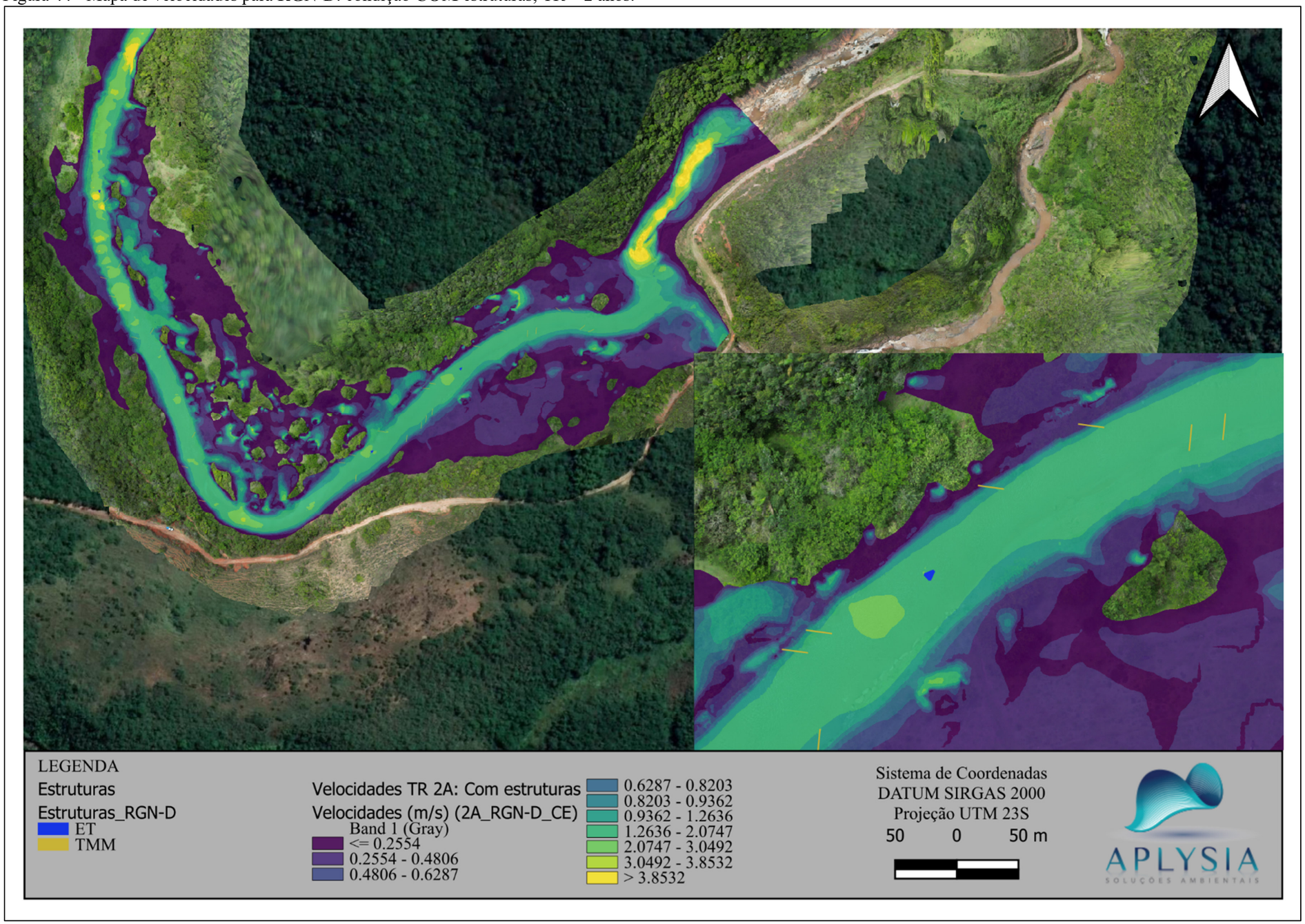
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 43 - Mapa de velocidades para **TG-11**: condição **COM** estruturas; Com efeito de Remanso; TR = **50** anos.



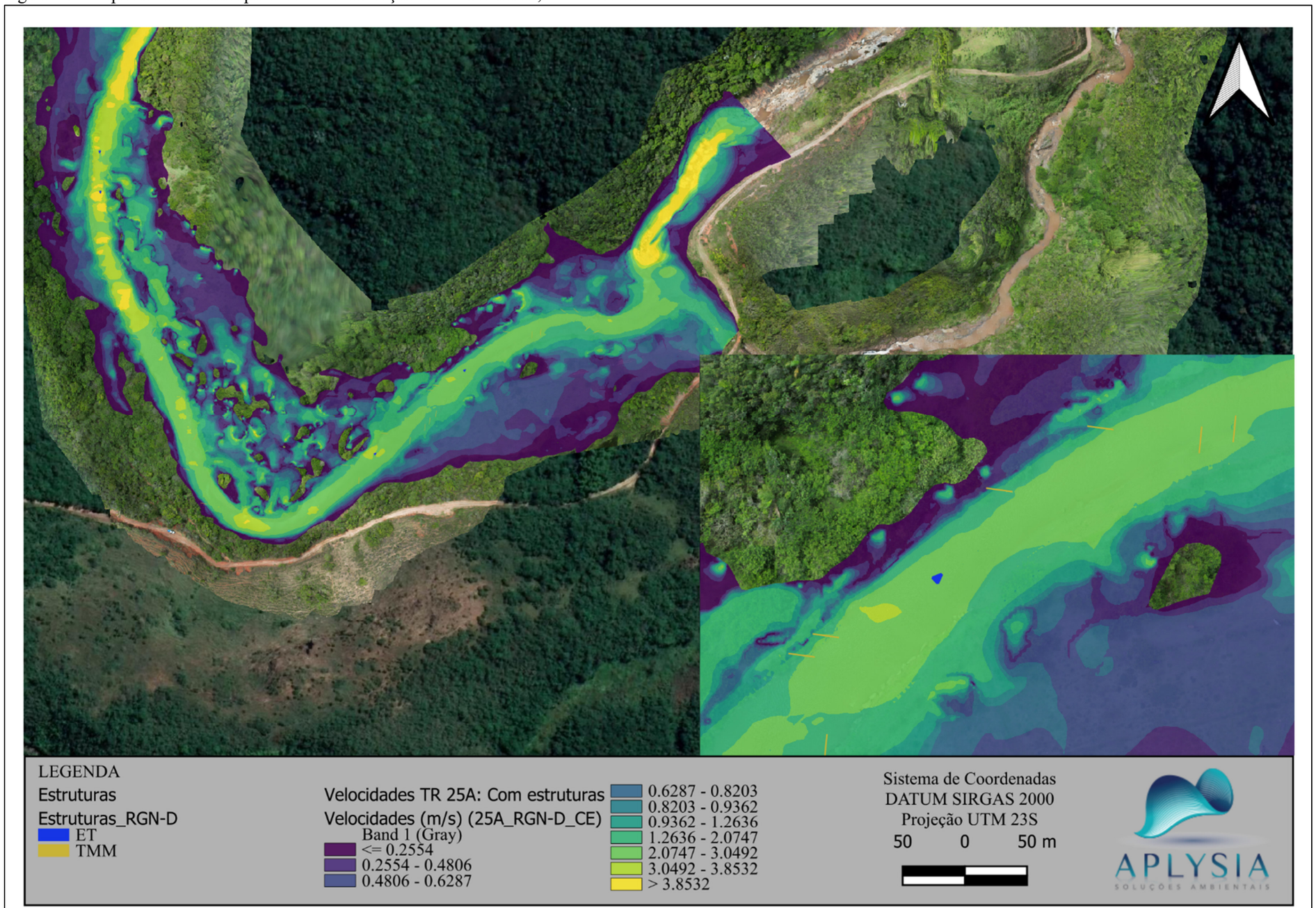
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 44 - Mapa de velocidades para **RGN-D**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



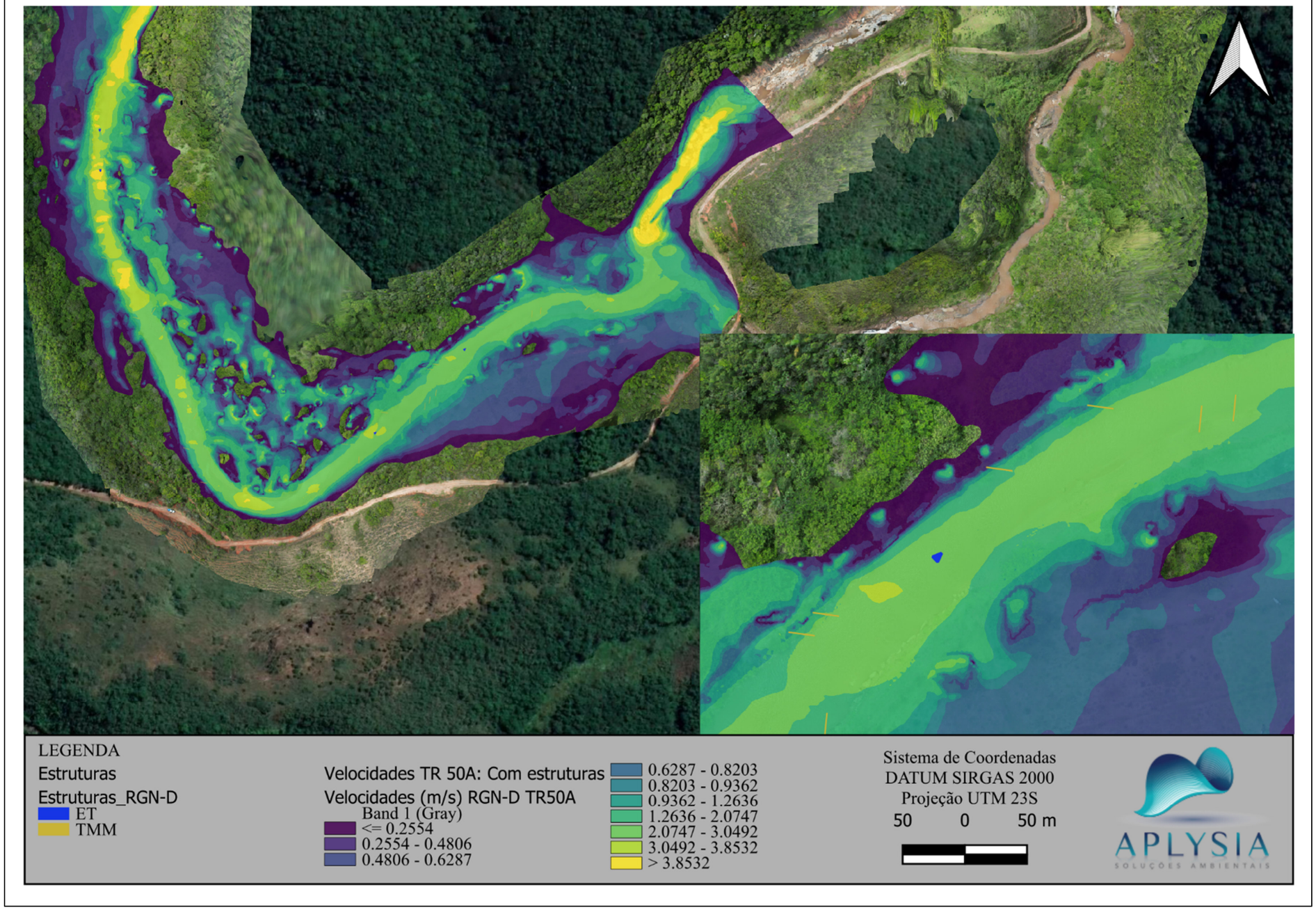
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 45 - Mapa de velocidades para **RGN-D**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



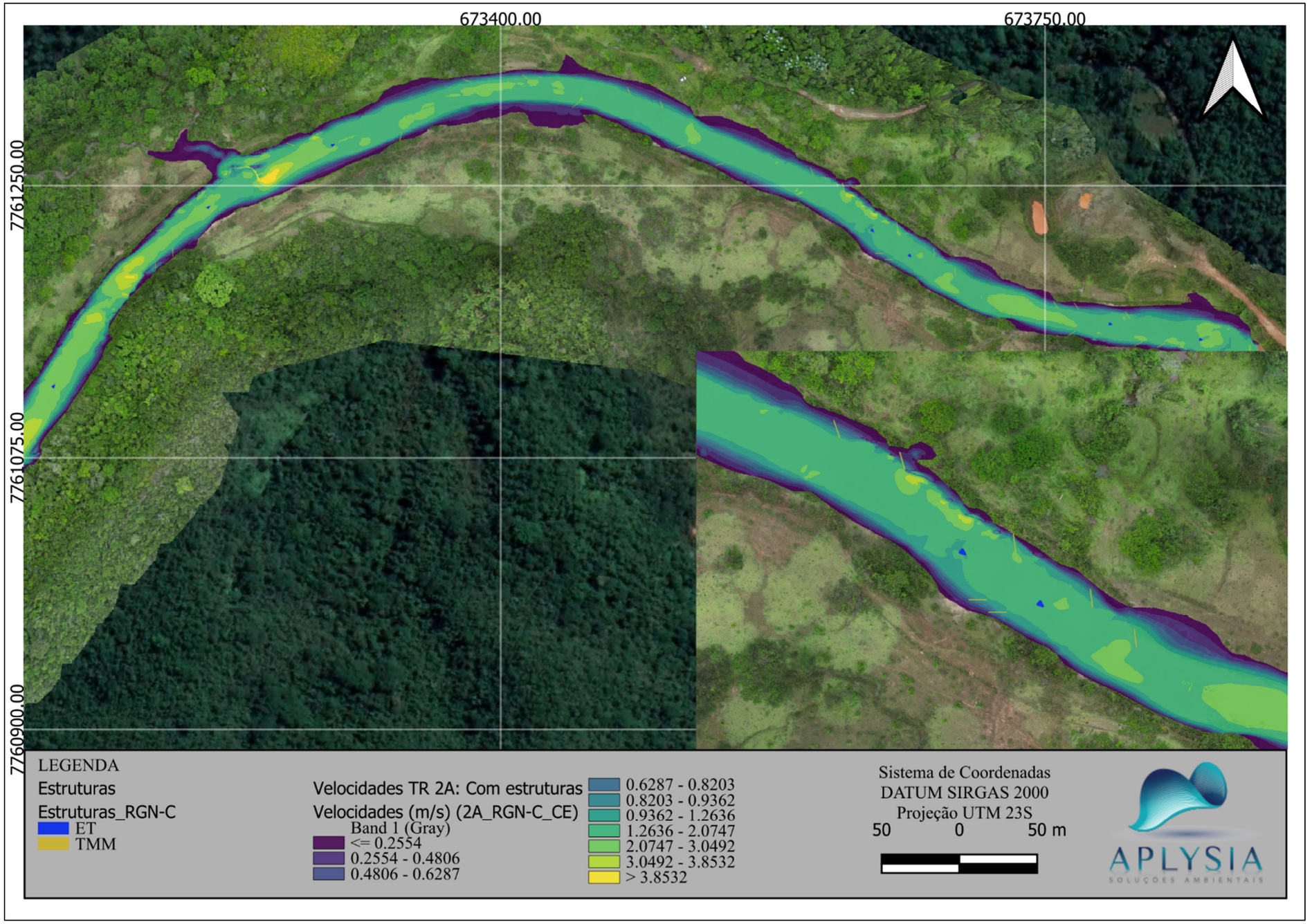
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 46 - Mapa de velocidades para **RGN-D**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



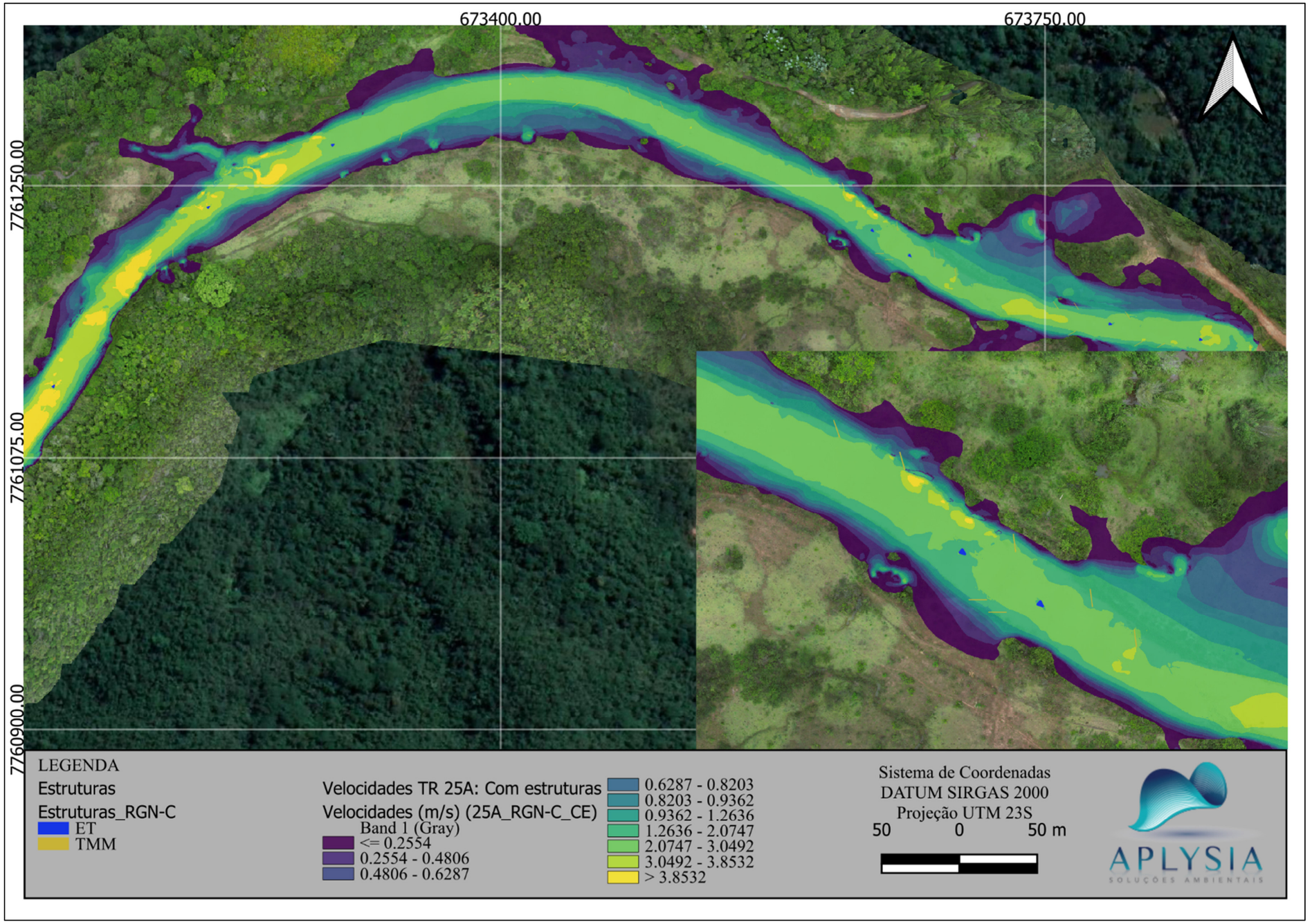
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 47 - Mapa de velocidades para **RGN-C**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



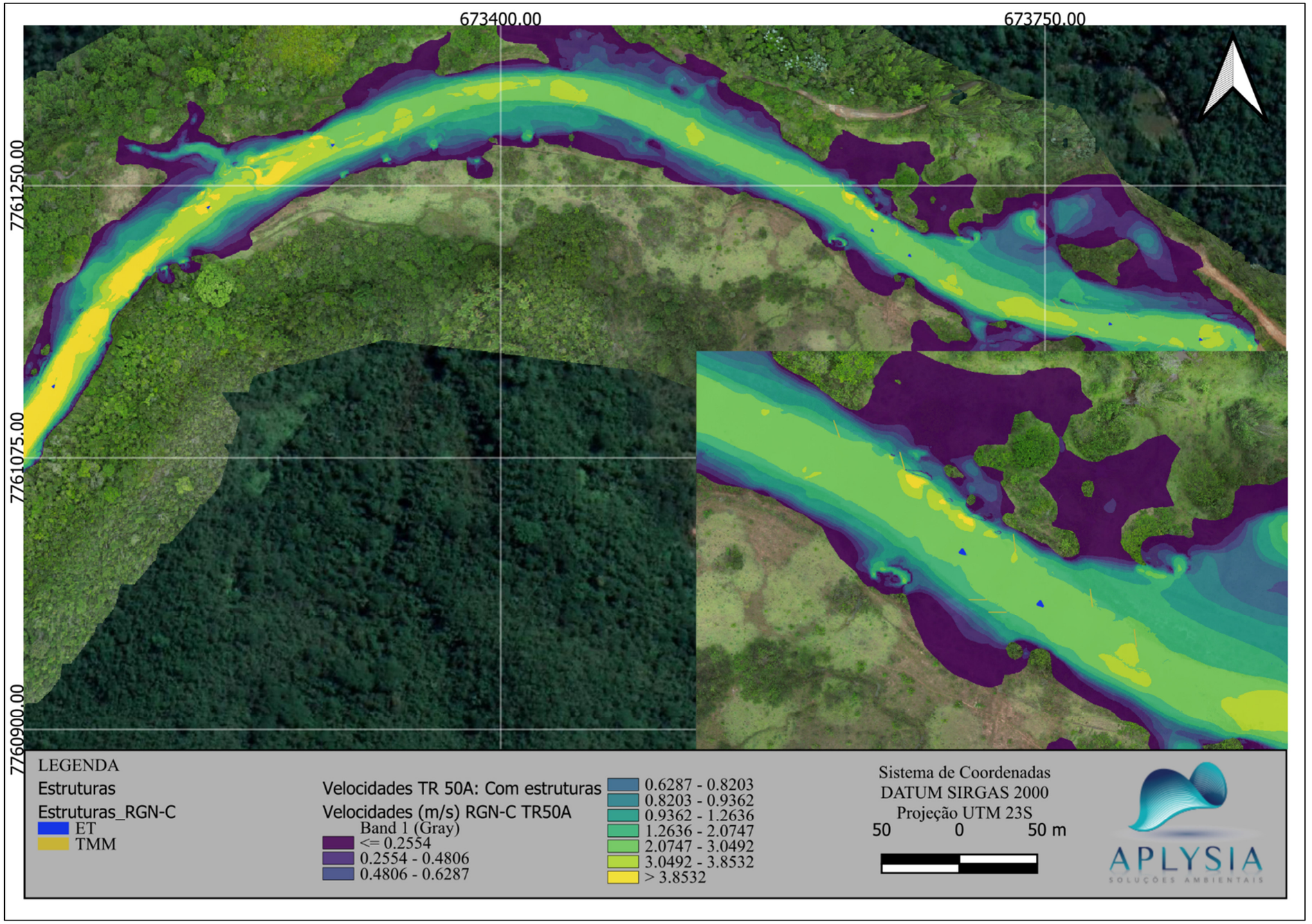
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 48 - Mapa de velocidades para **RGN-C**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



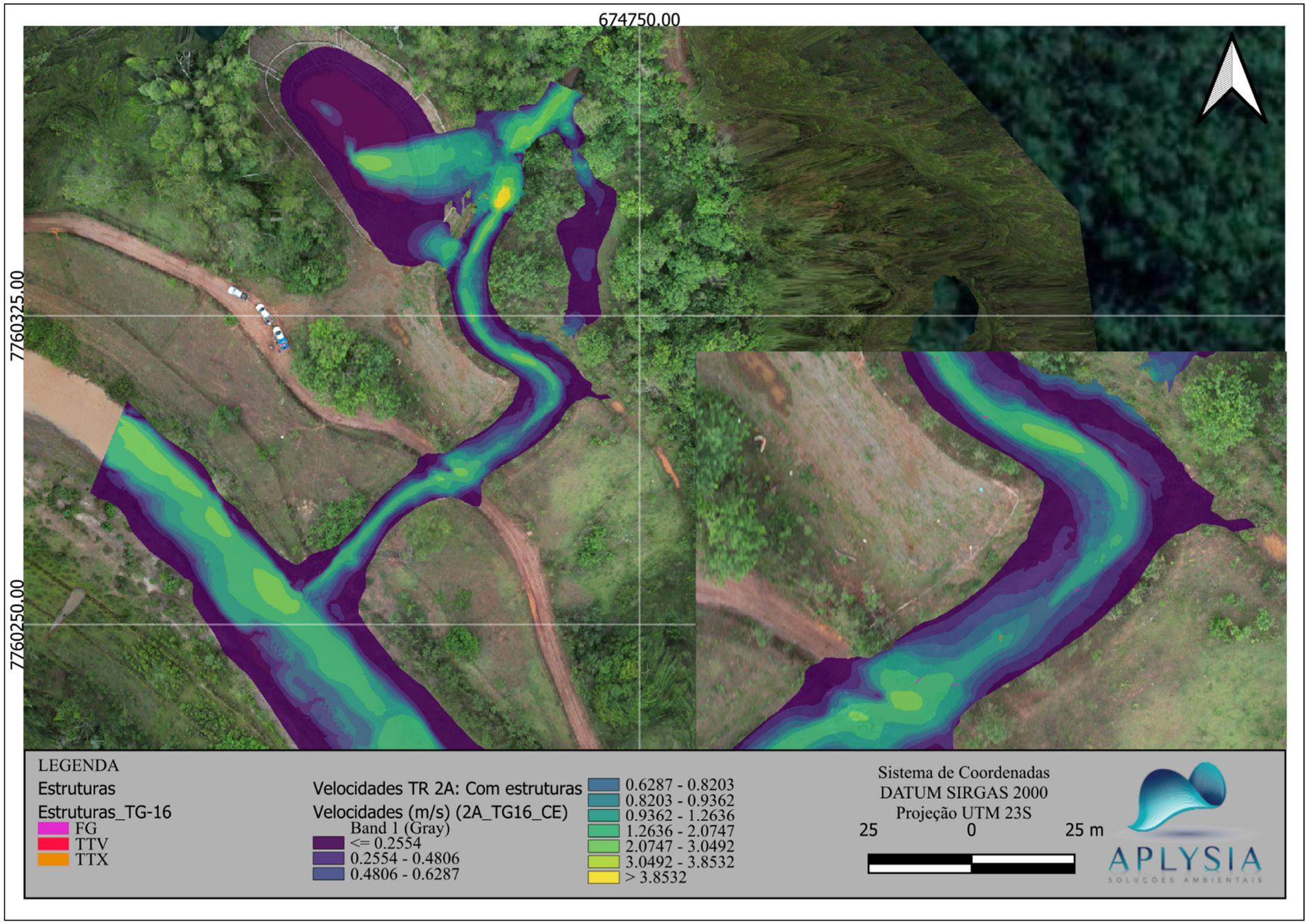
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 49 - Mapa de velocidades para **RGN-C**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



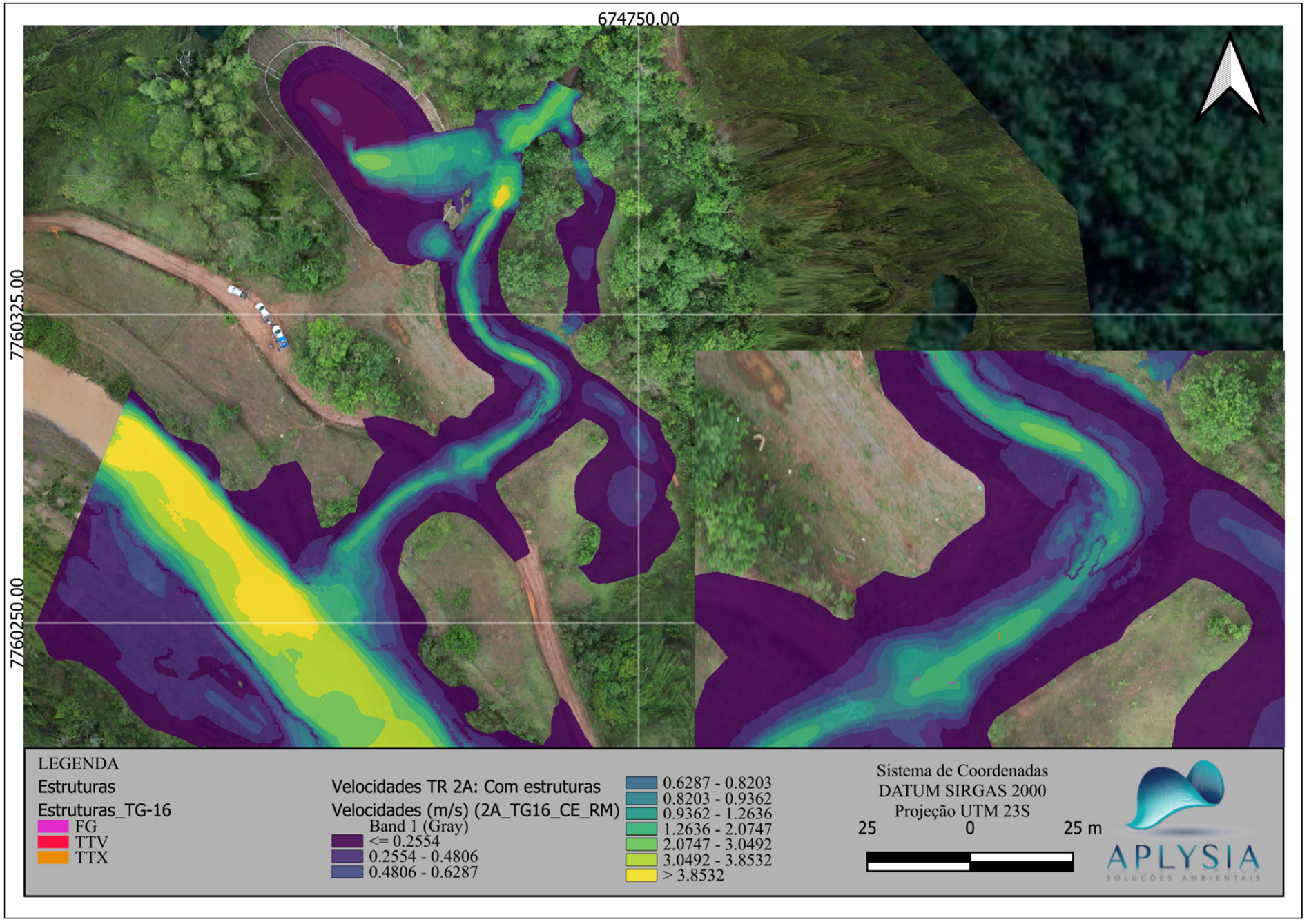
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 50 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



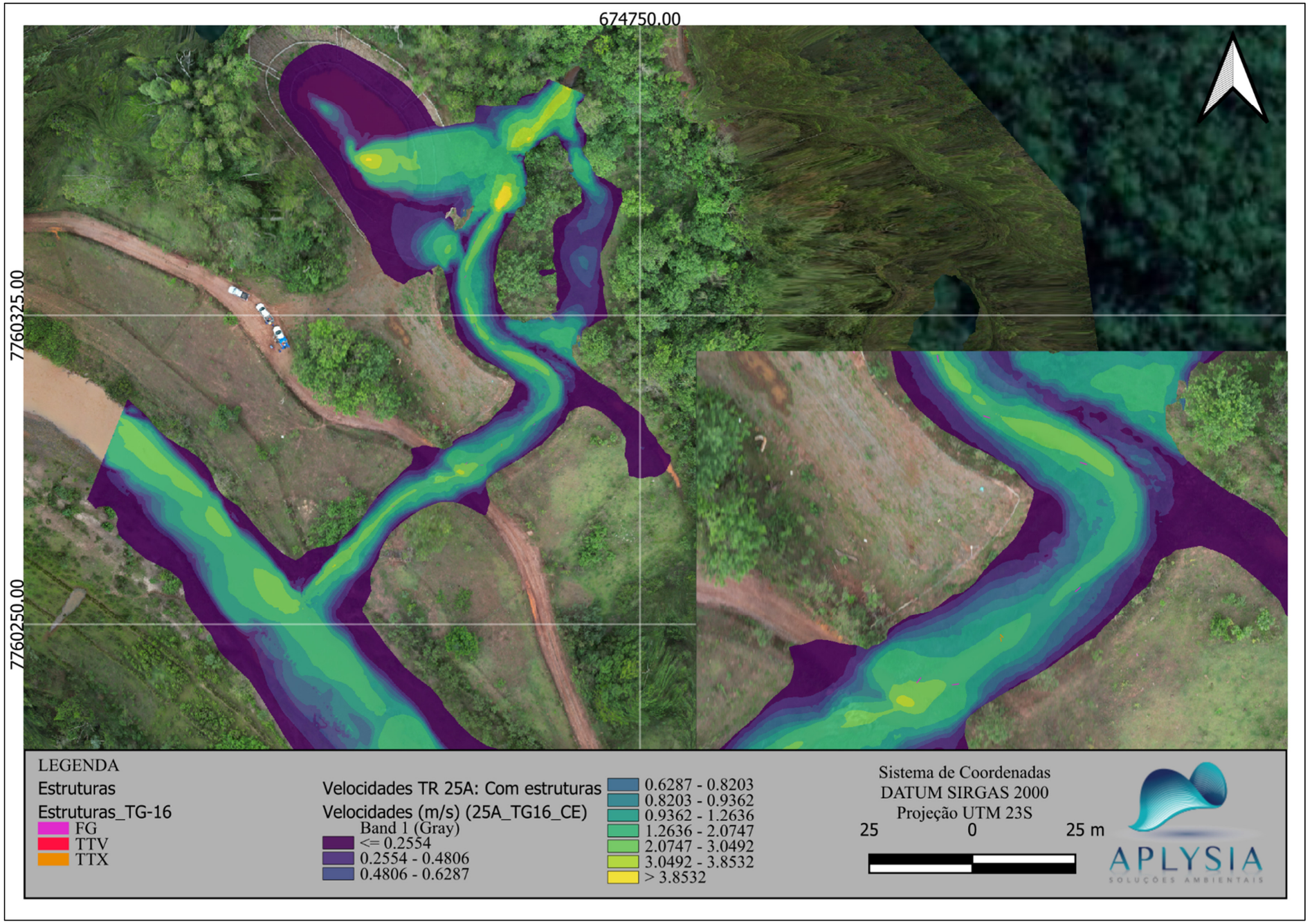
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 51 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **2** anos.



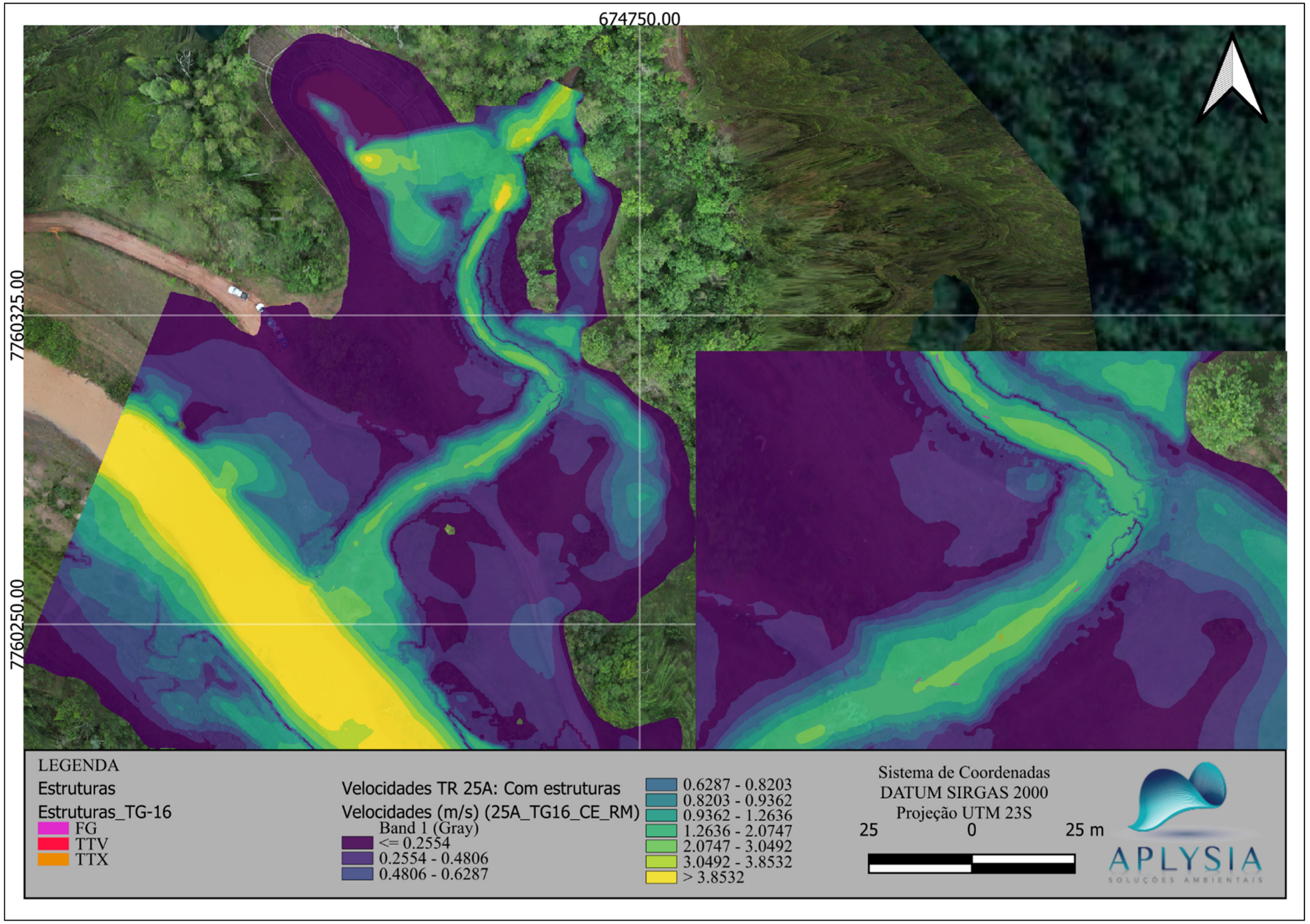
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 52 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



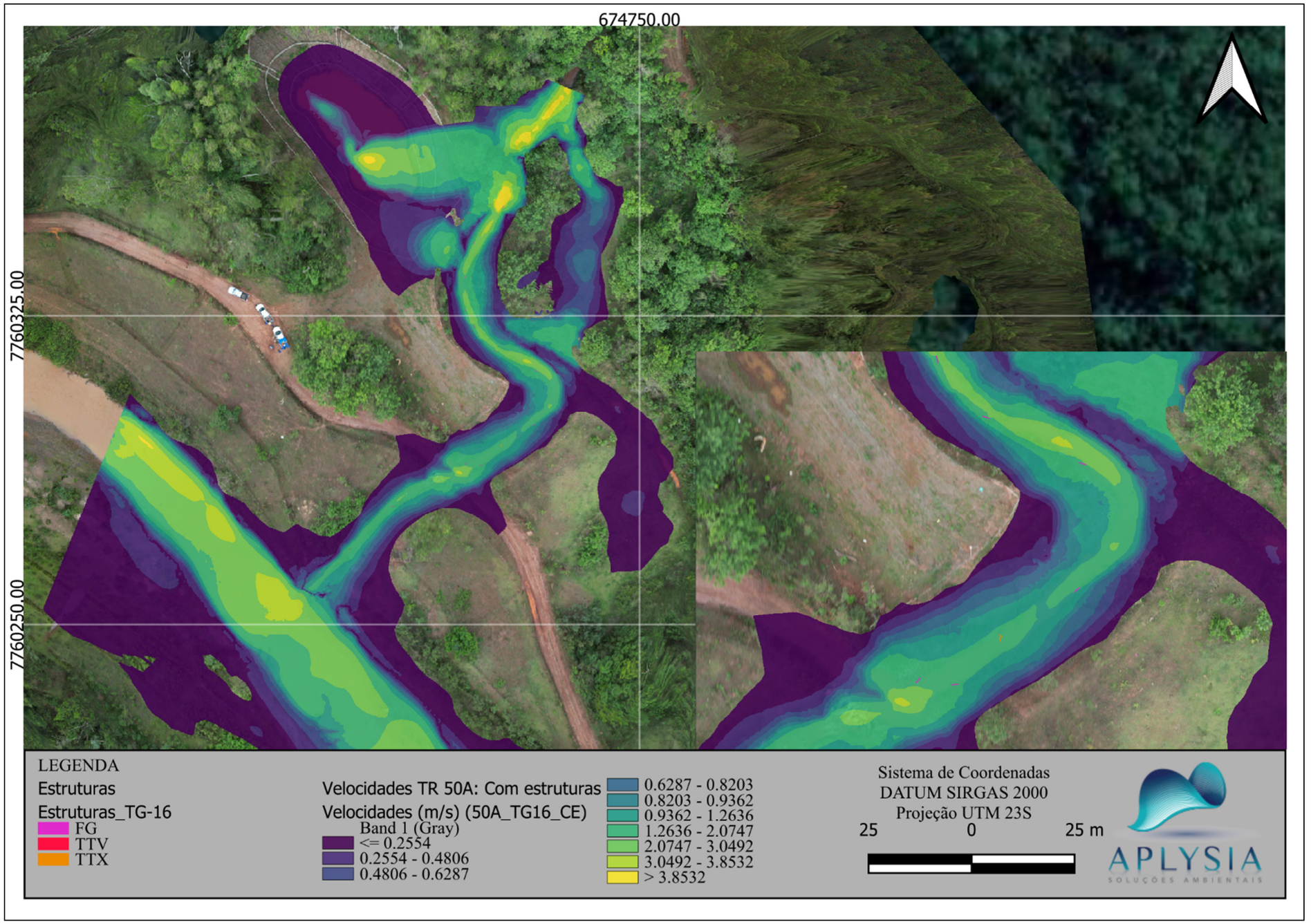
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 53 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **25** anos.



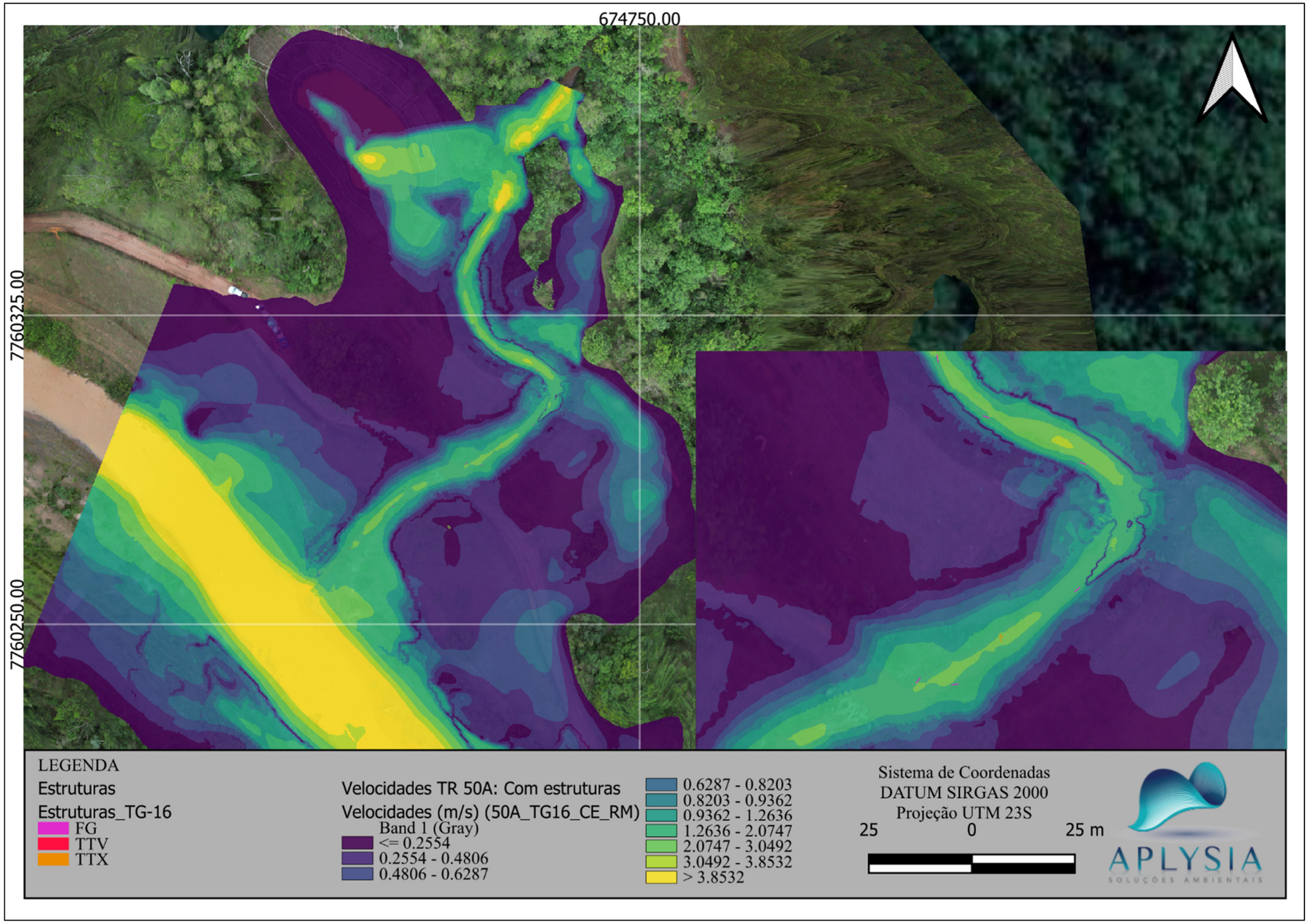
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 54 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



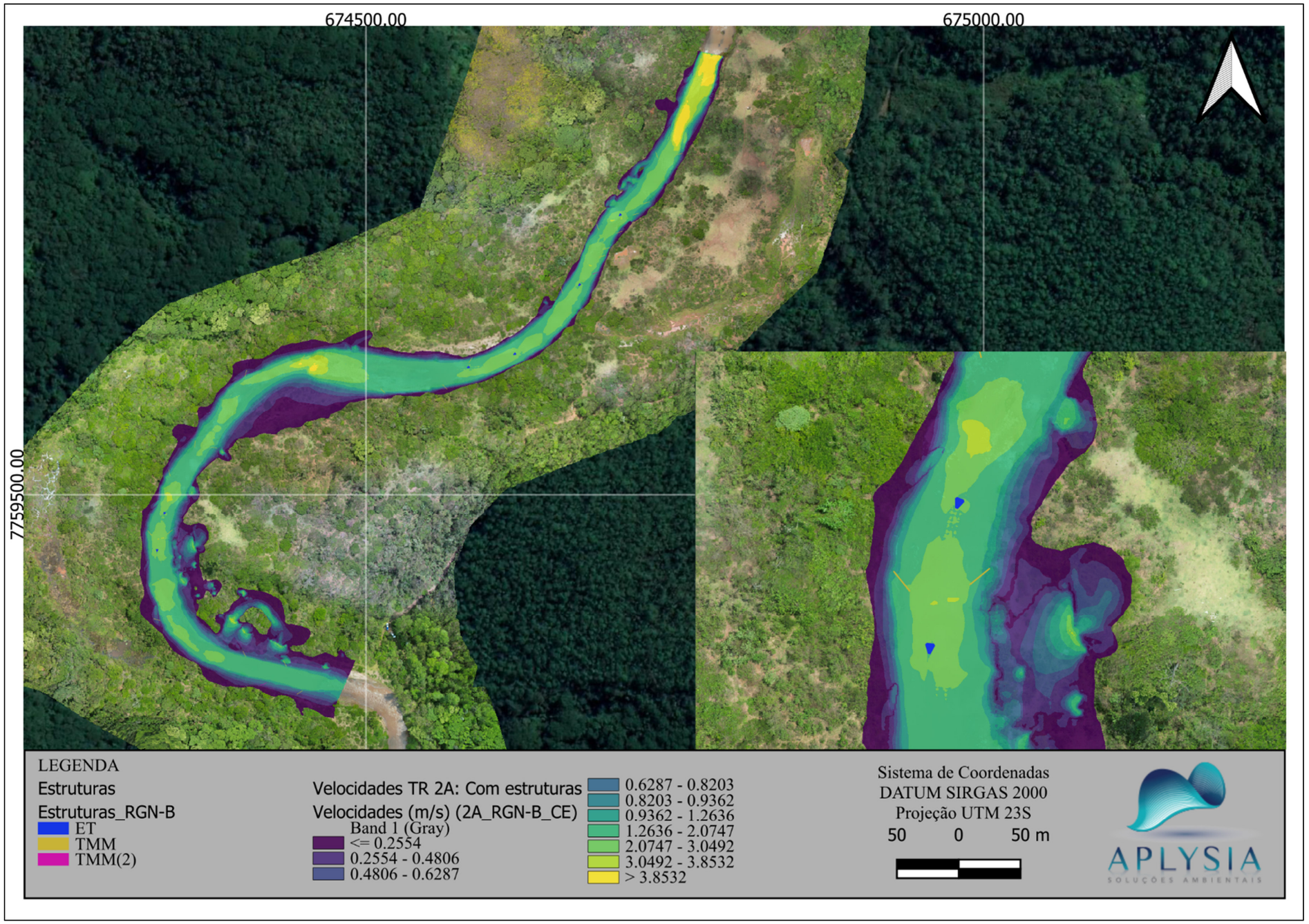
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 55 - Mapa de velocidades para **TG-16**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **50** anos.



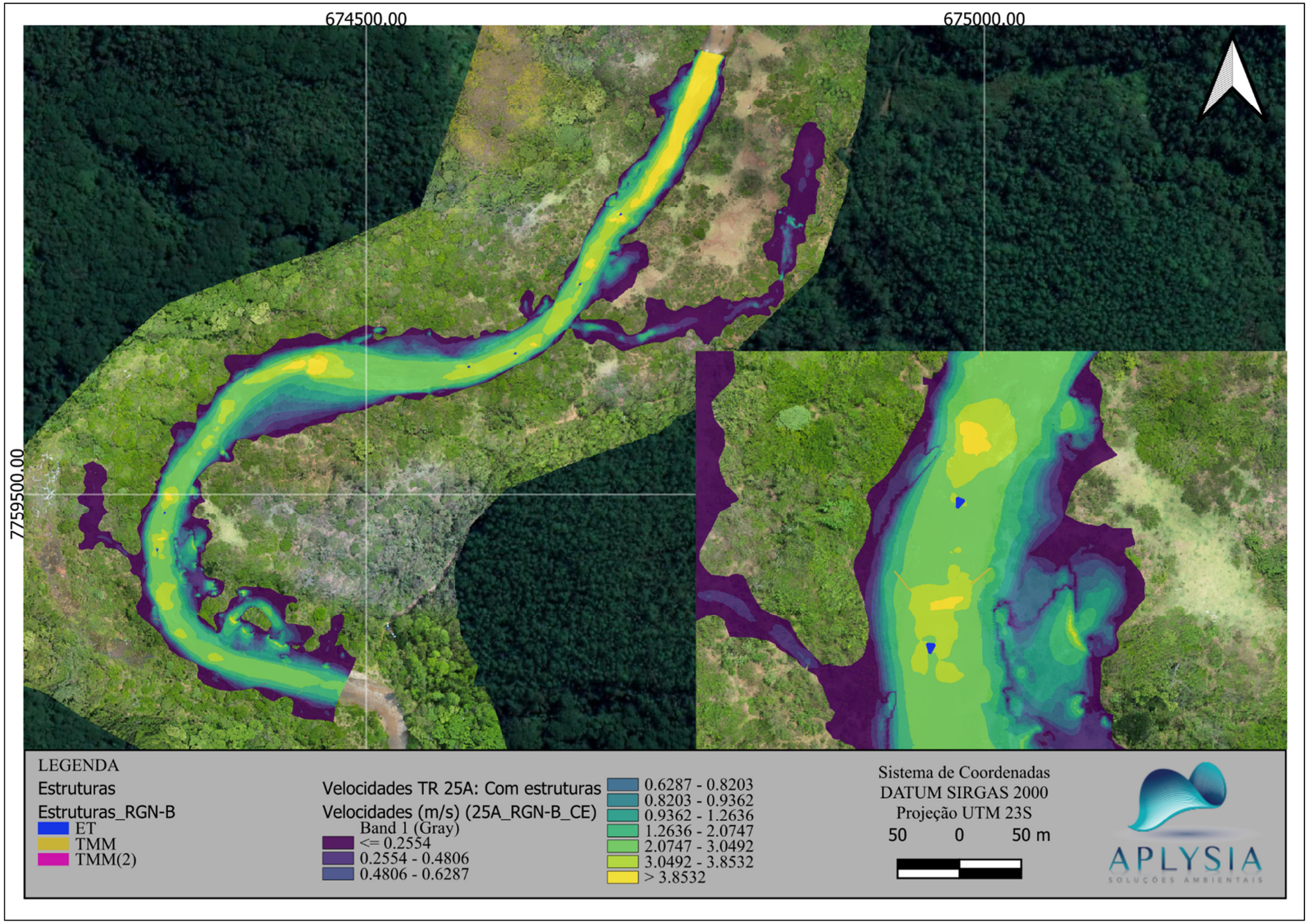
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 56 - Mapa de velocidades para **RGN-B**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



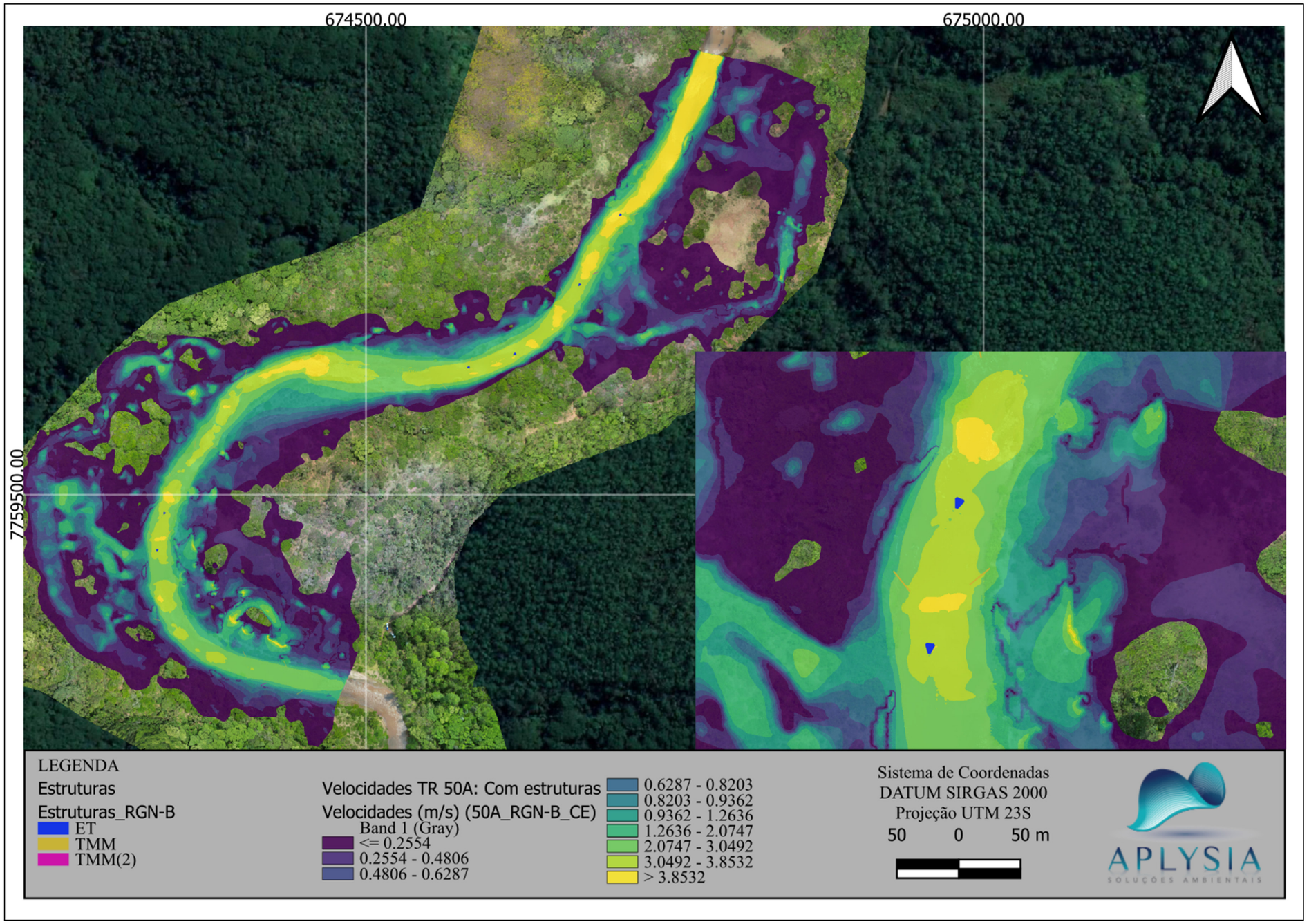
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 57 - Mapa de velocidades para **RGN-B**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



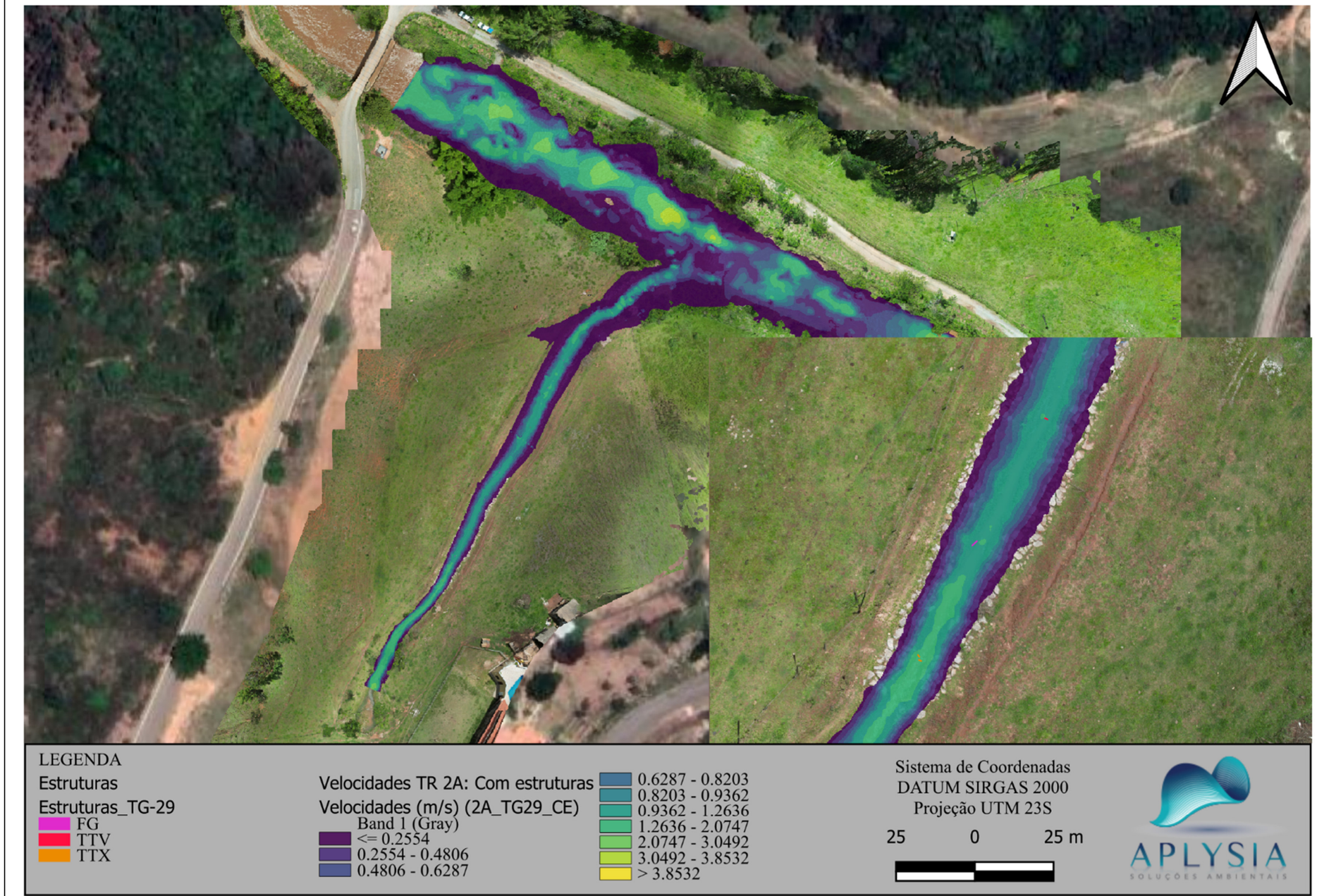
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 58 - Mapa de velocidades para **RGN-B**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



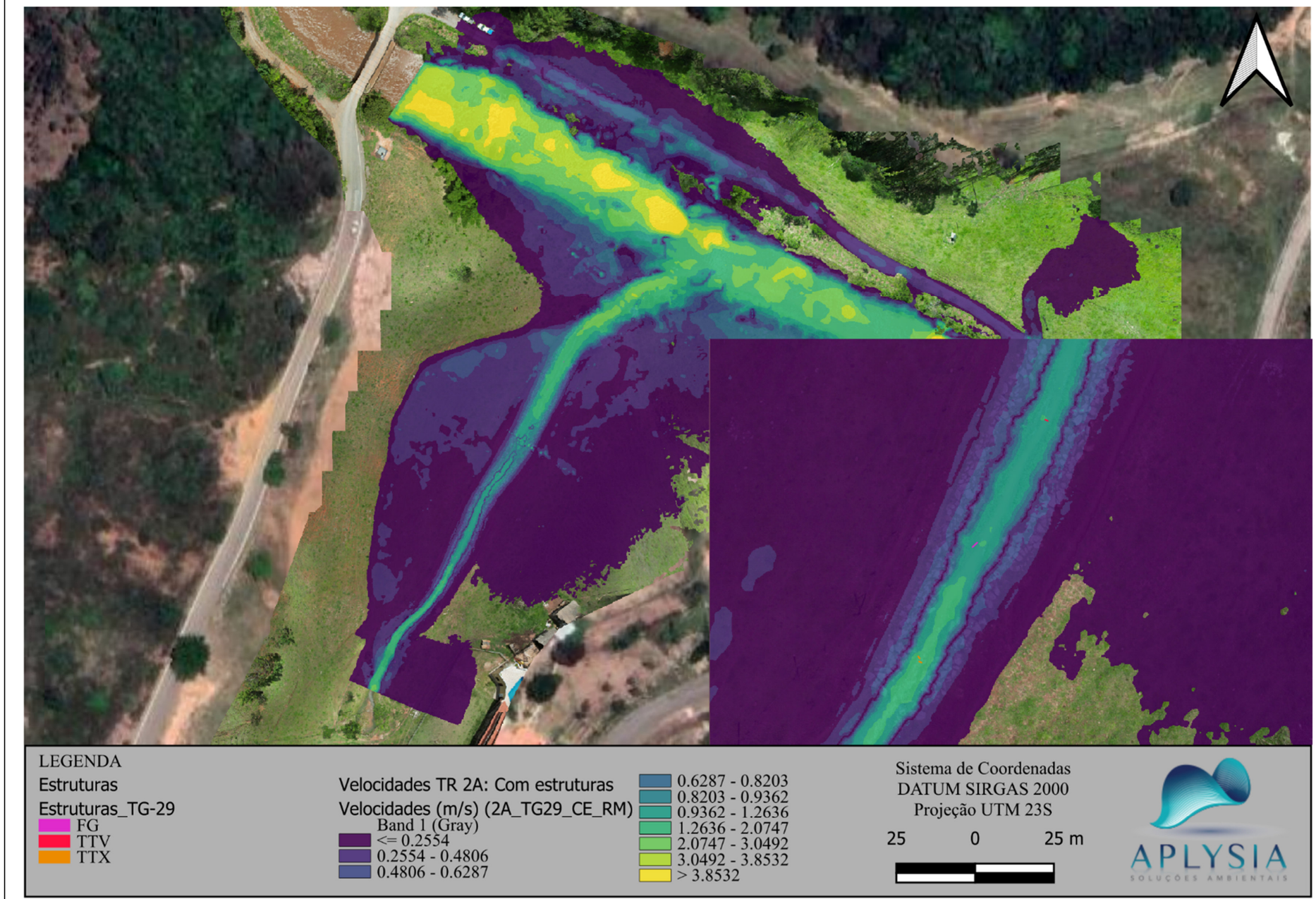
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 59 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



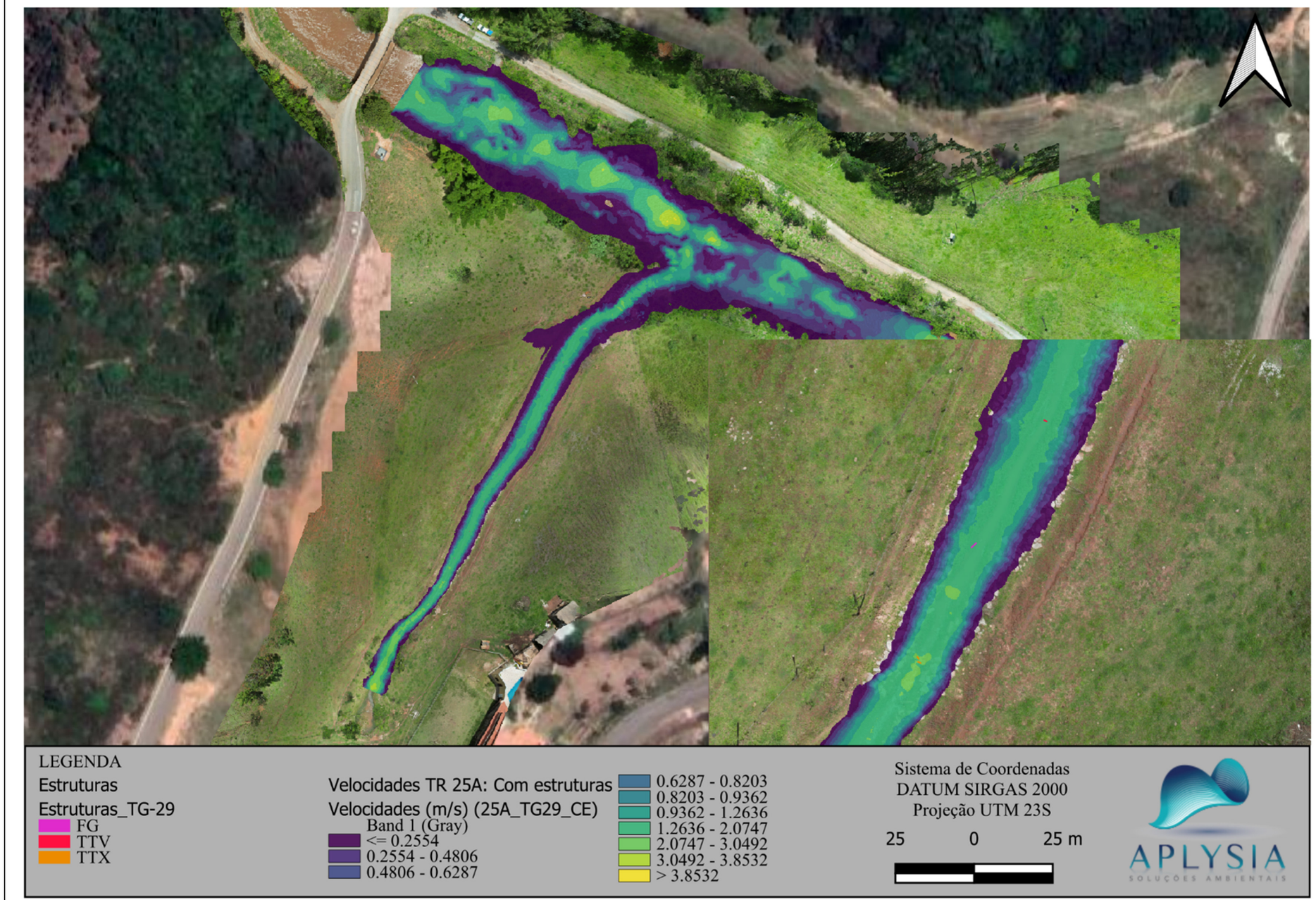
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 60 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **2** anos.



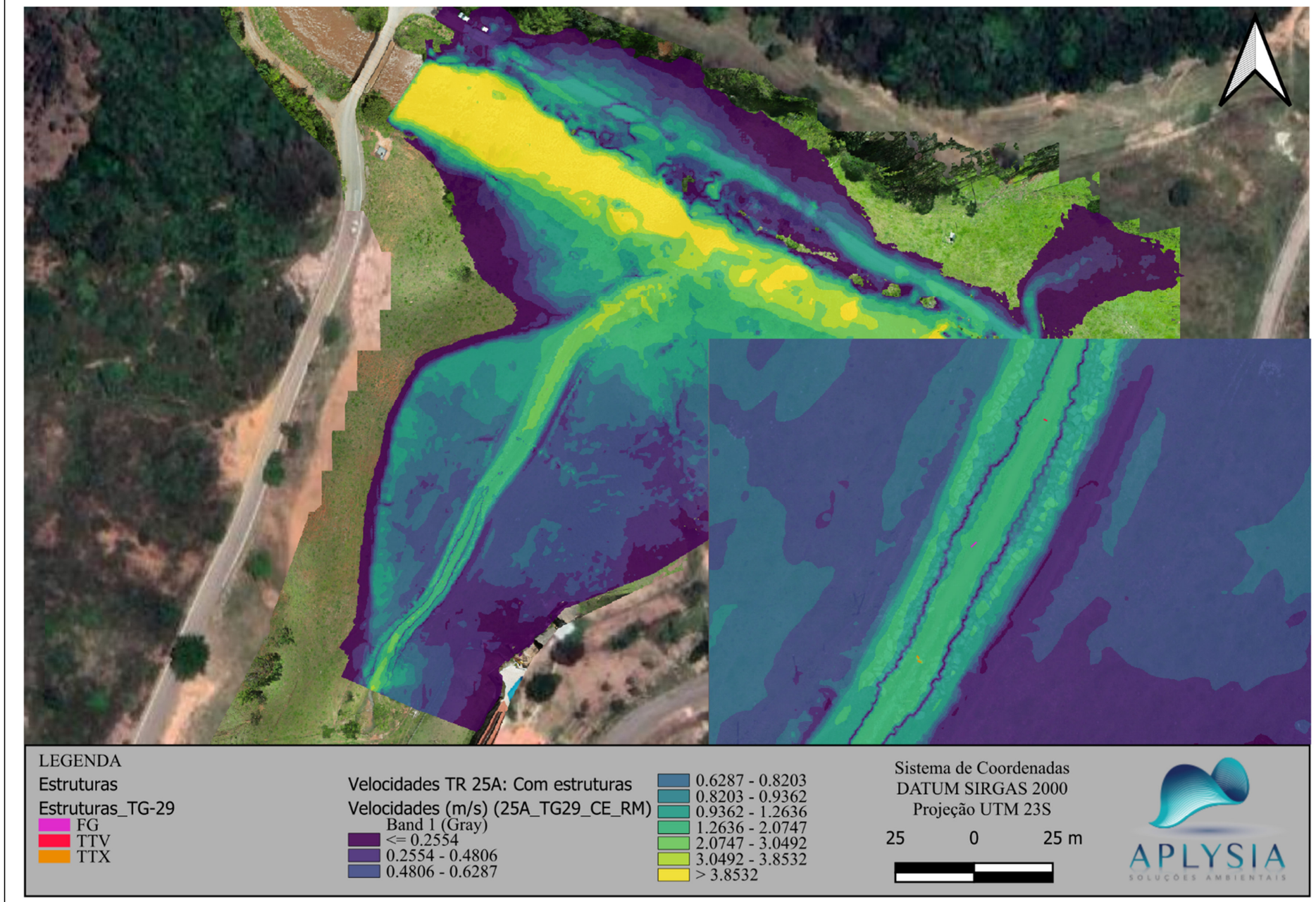
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 61 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



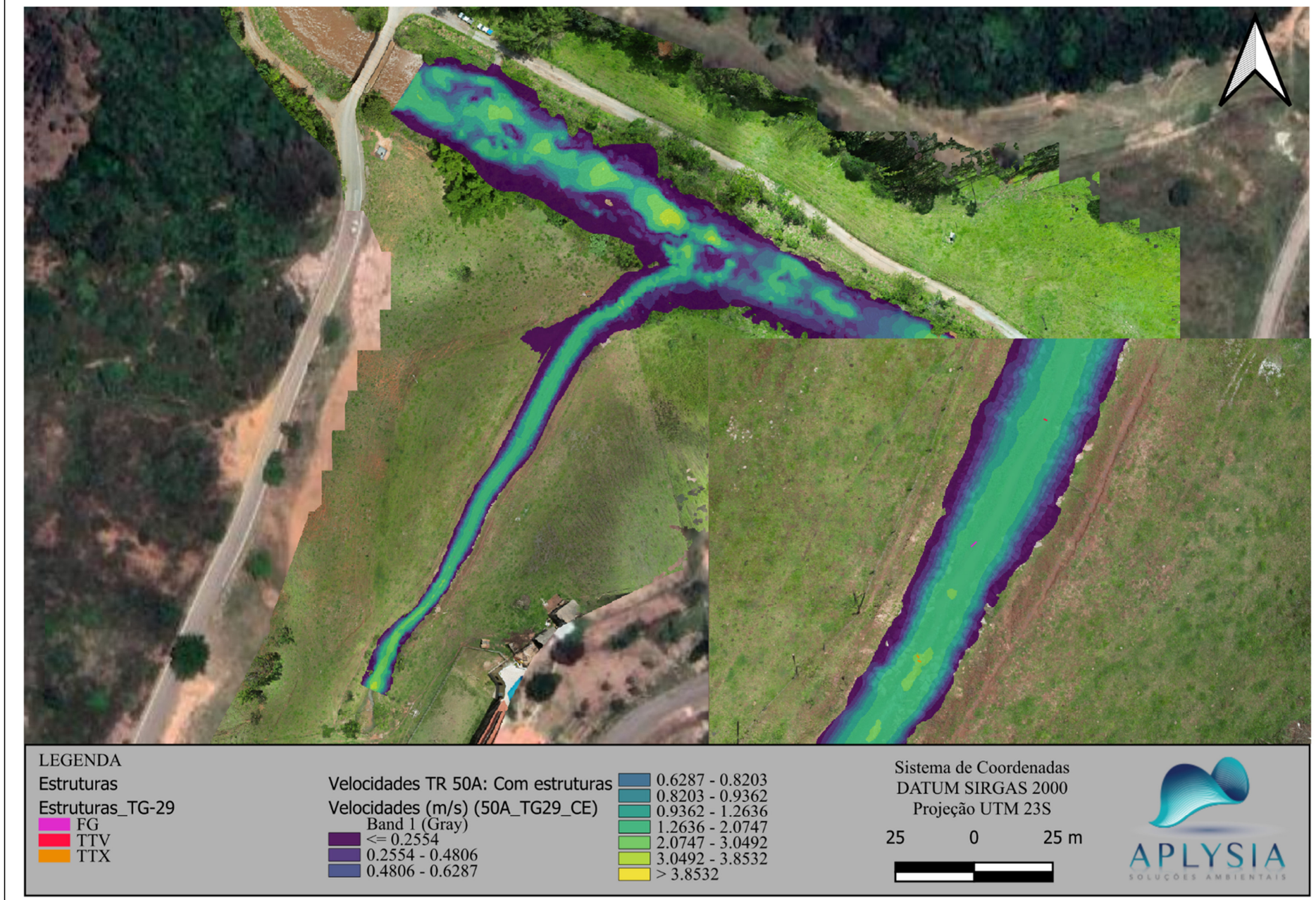
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 62 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **25** anos.



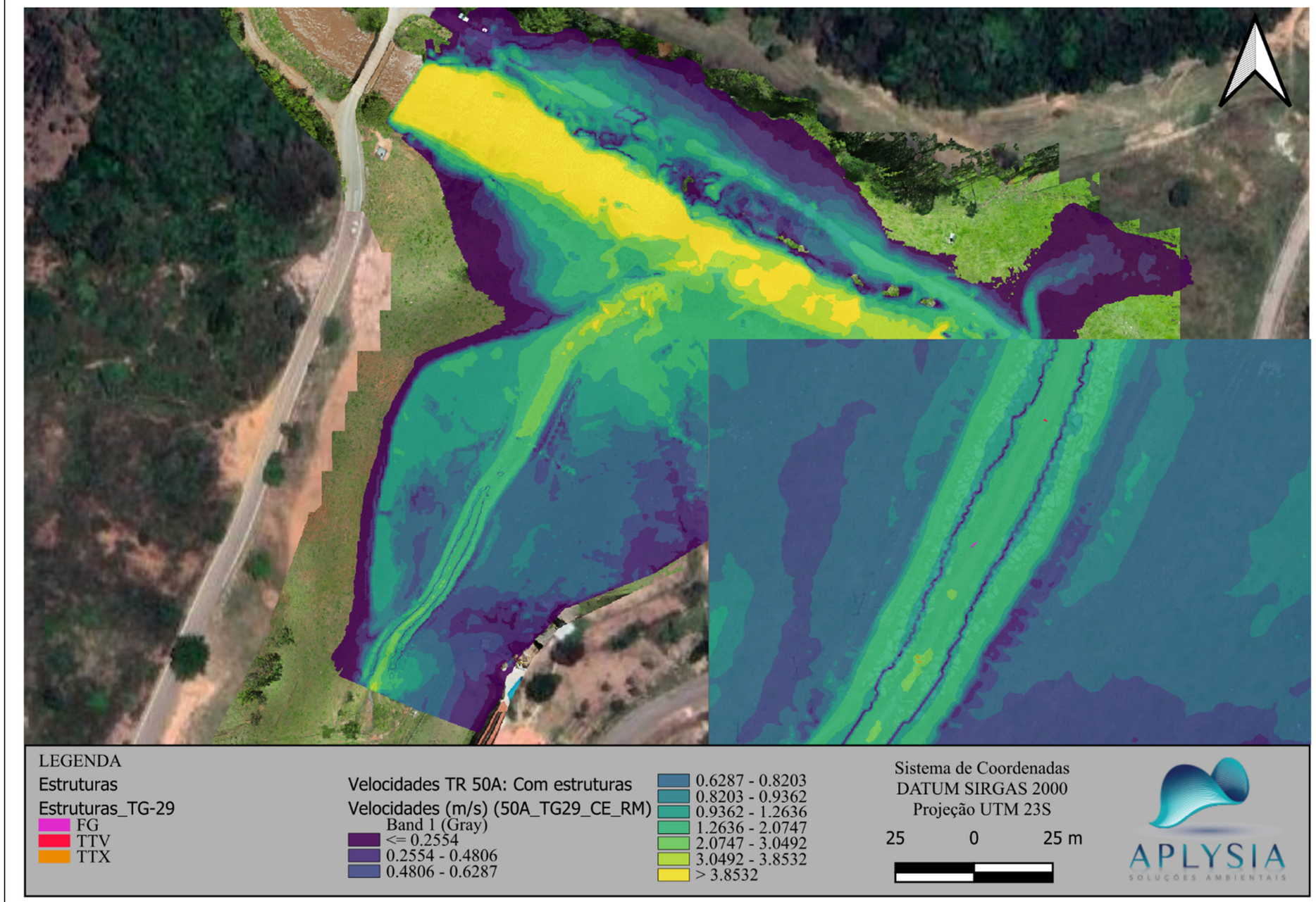
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 63 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



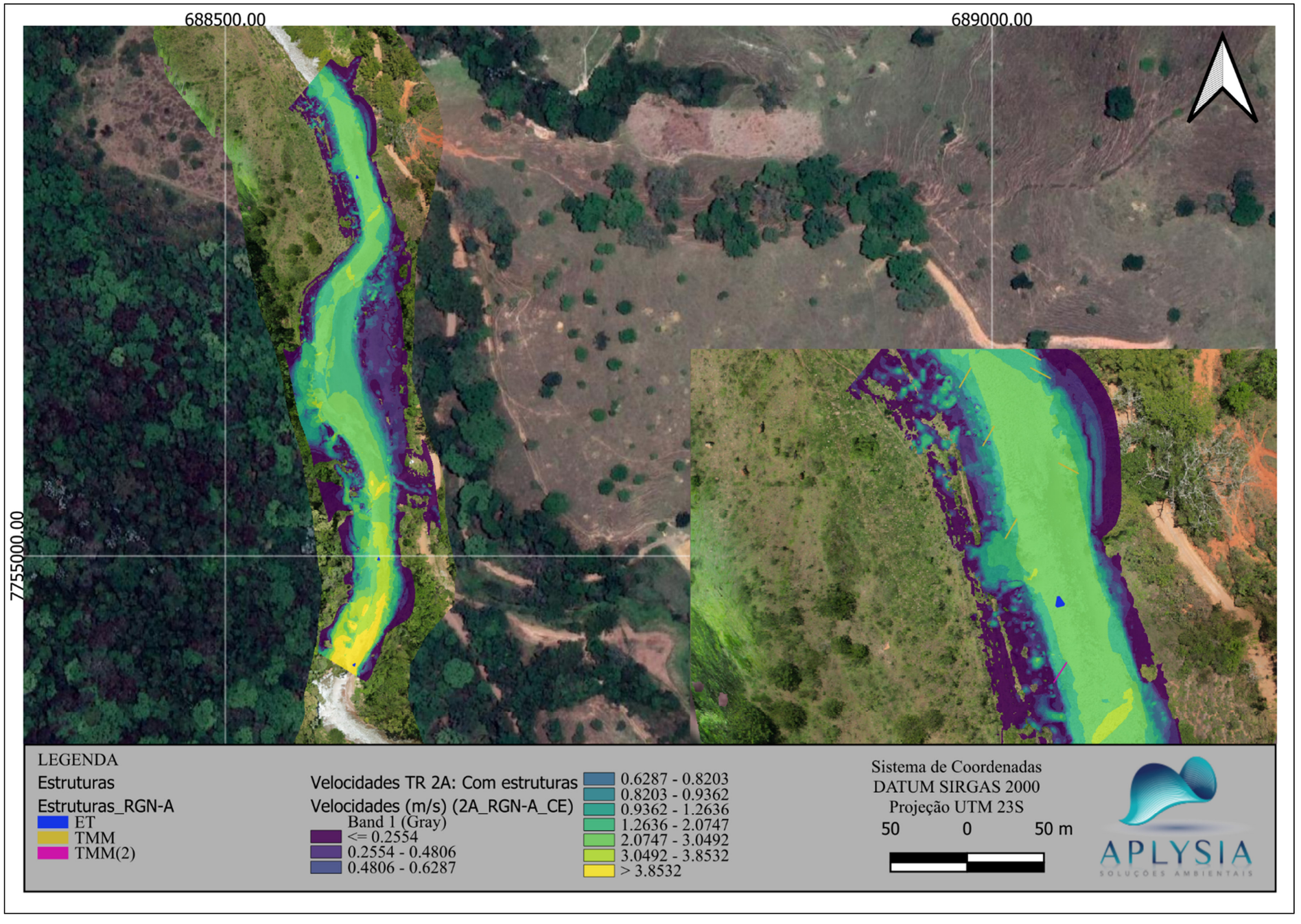
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 64 - Mapa de velocidades para **TG-29**: condição **COM** estruturas; Com Efeito de Remanso; TR = **50** anos.



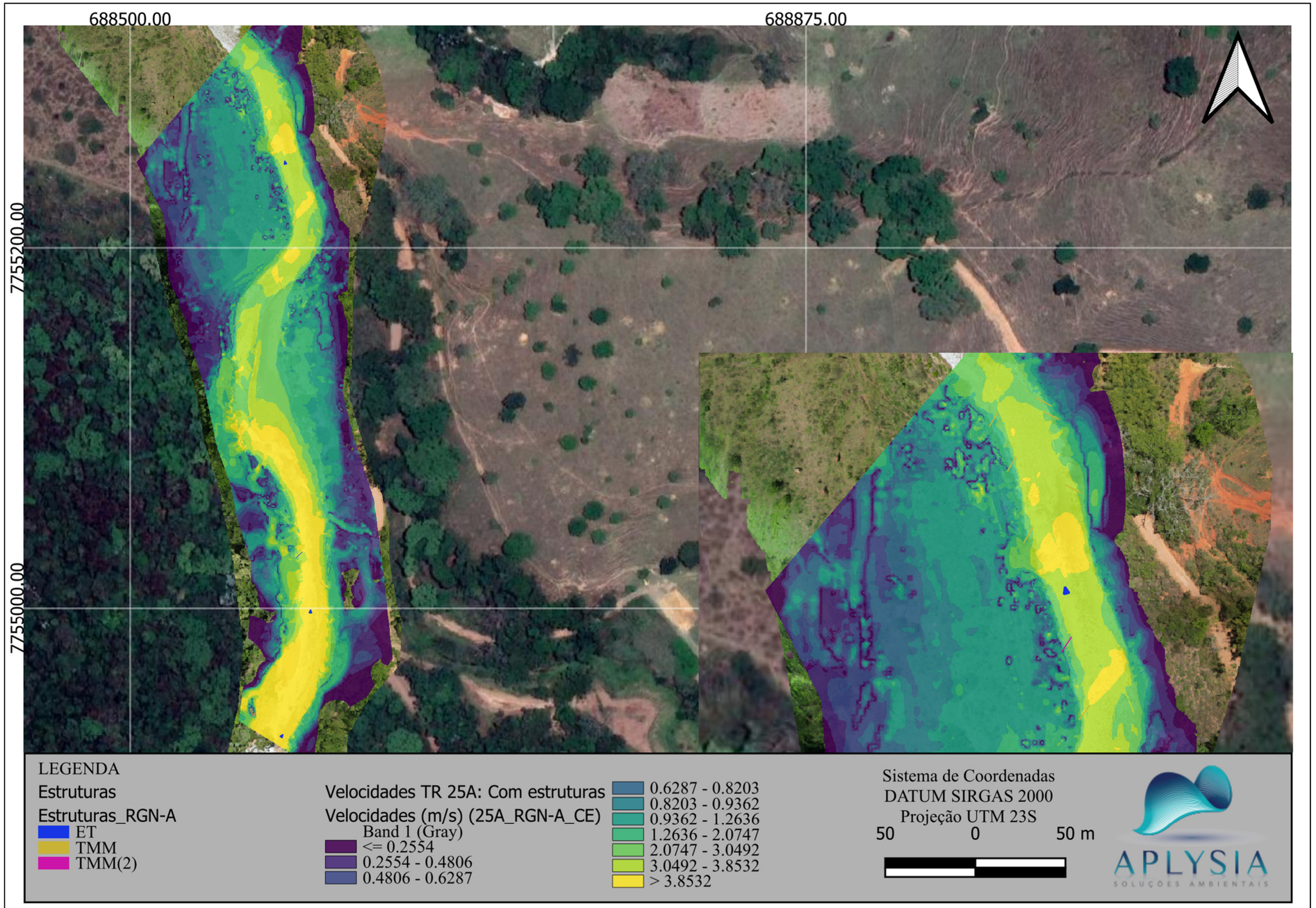
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 65 - Mapa de velocidades para **RGN-A**: condição **COM** estruturas; TR = **2** anos.



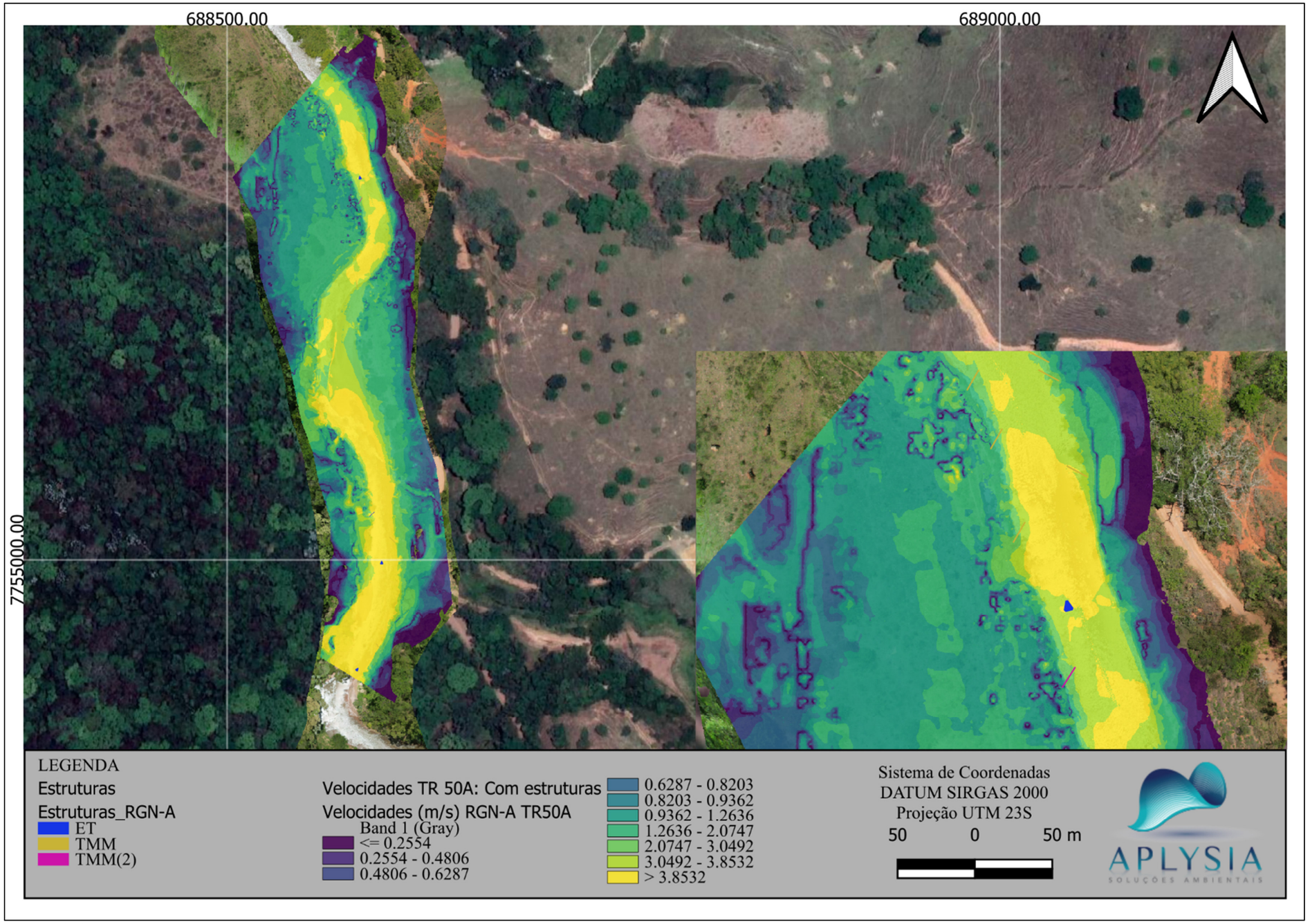
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 66 - Mapa de velocidades para **RGN-A**: condição **COM** estruturas; TR = **25** anos.



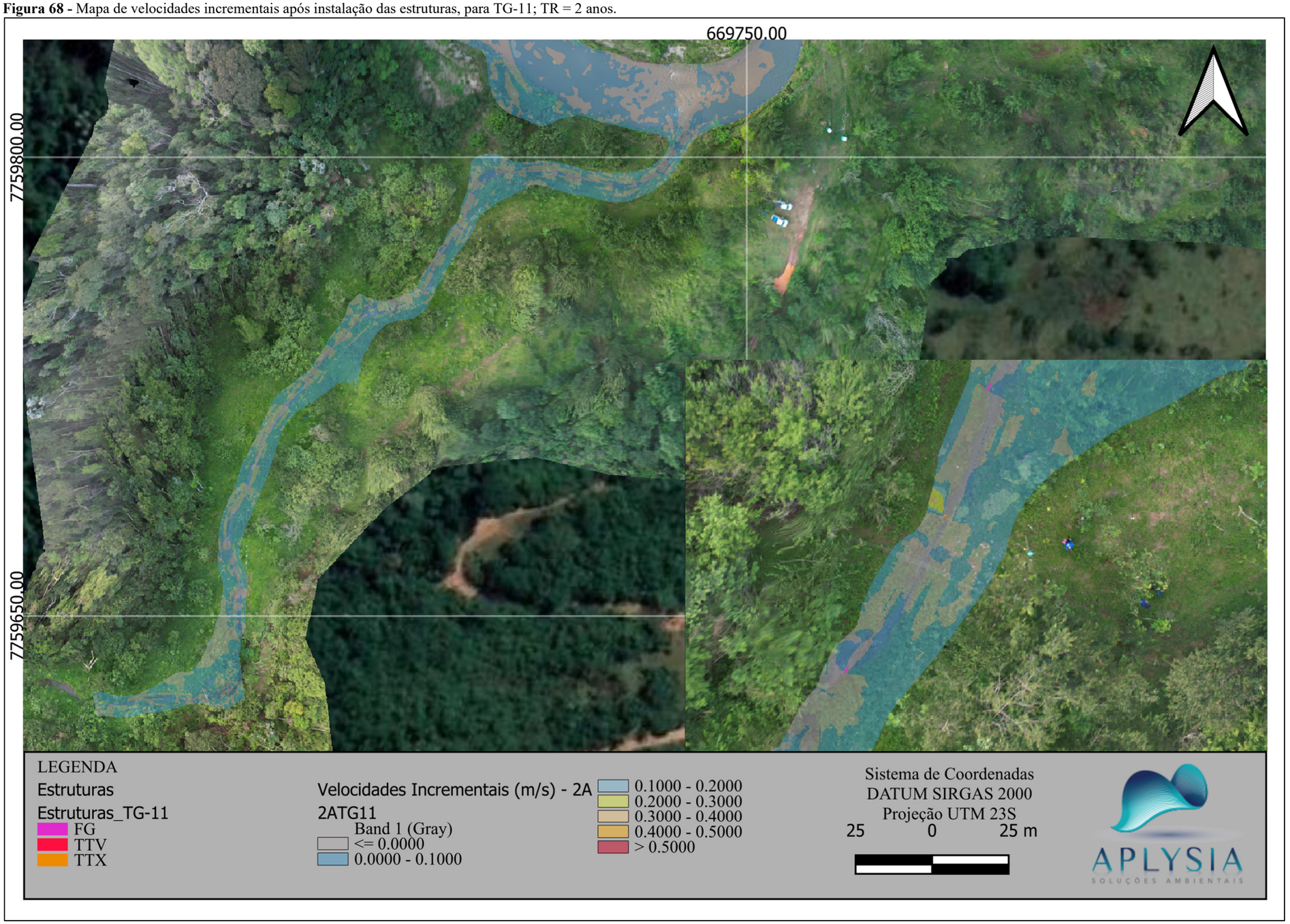
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 67 - Mapa de velocidades para **RGN-A**: condição **COM** estruturas; TR = **50** anos.



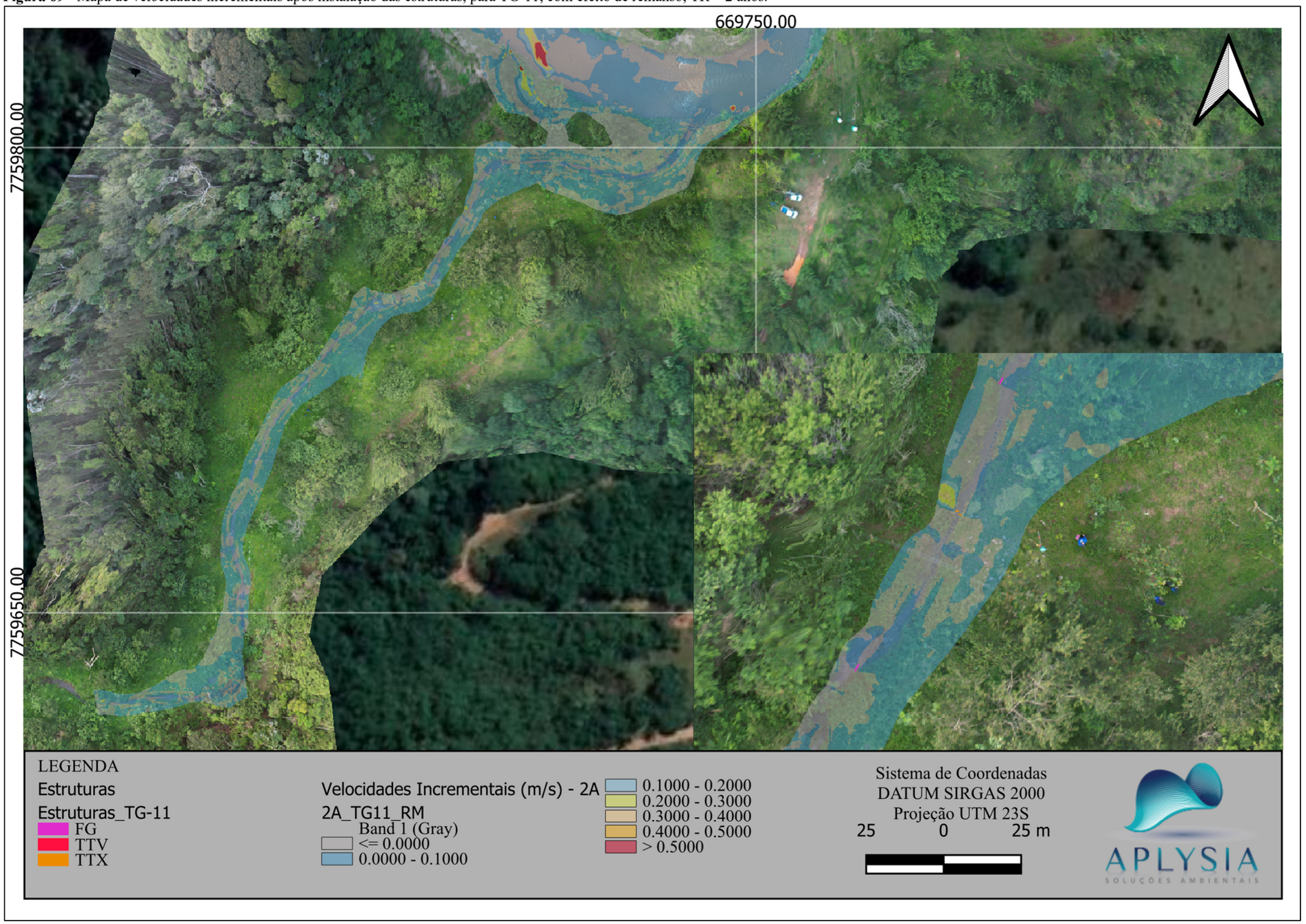
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 68 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; TR = 2 anos.



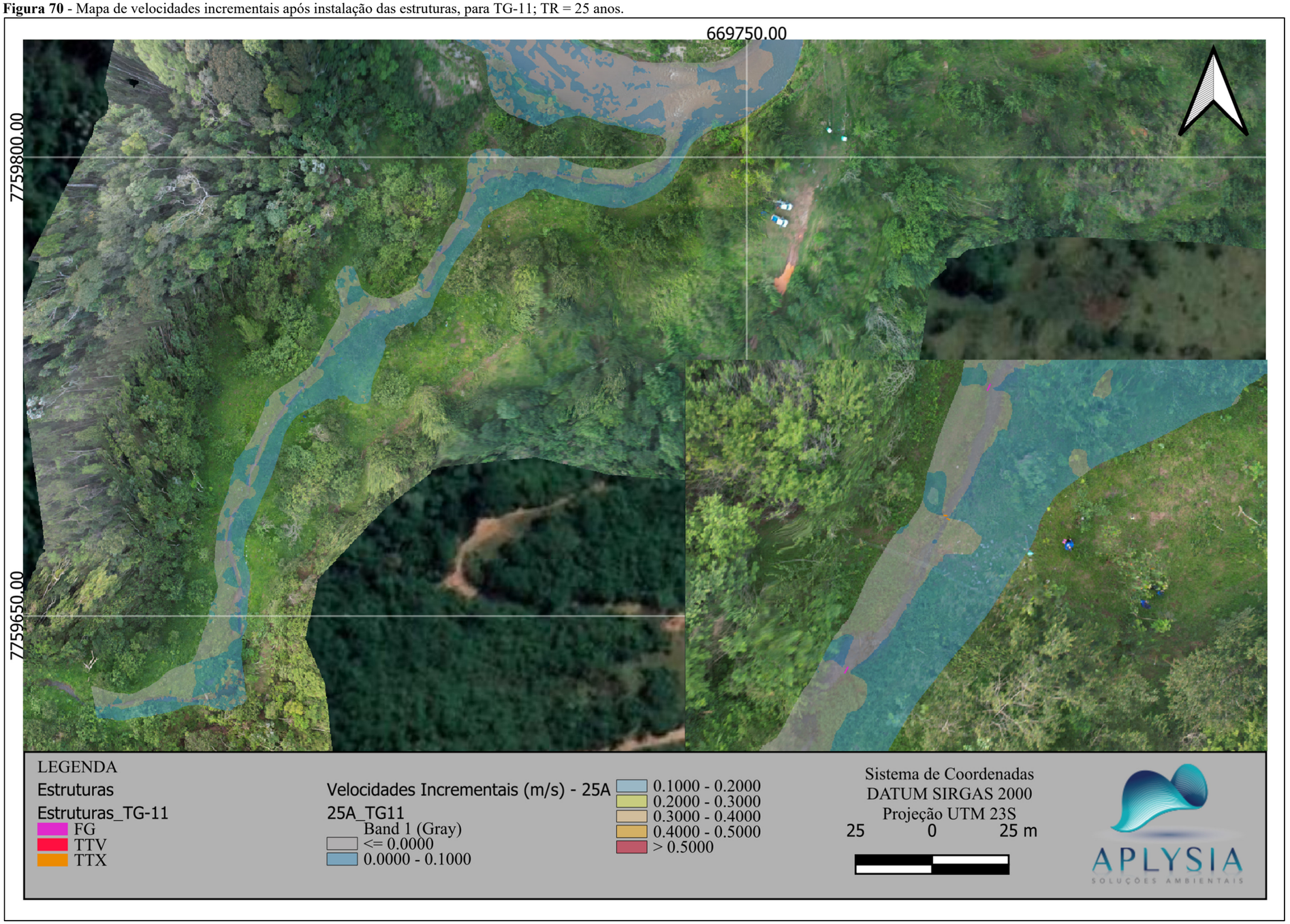
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 69 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; com efeito de remanso; TR = 2 anos.



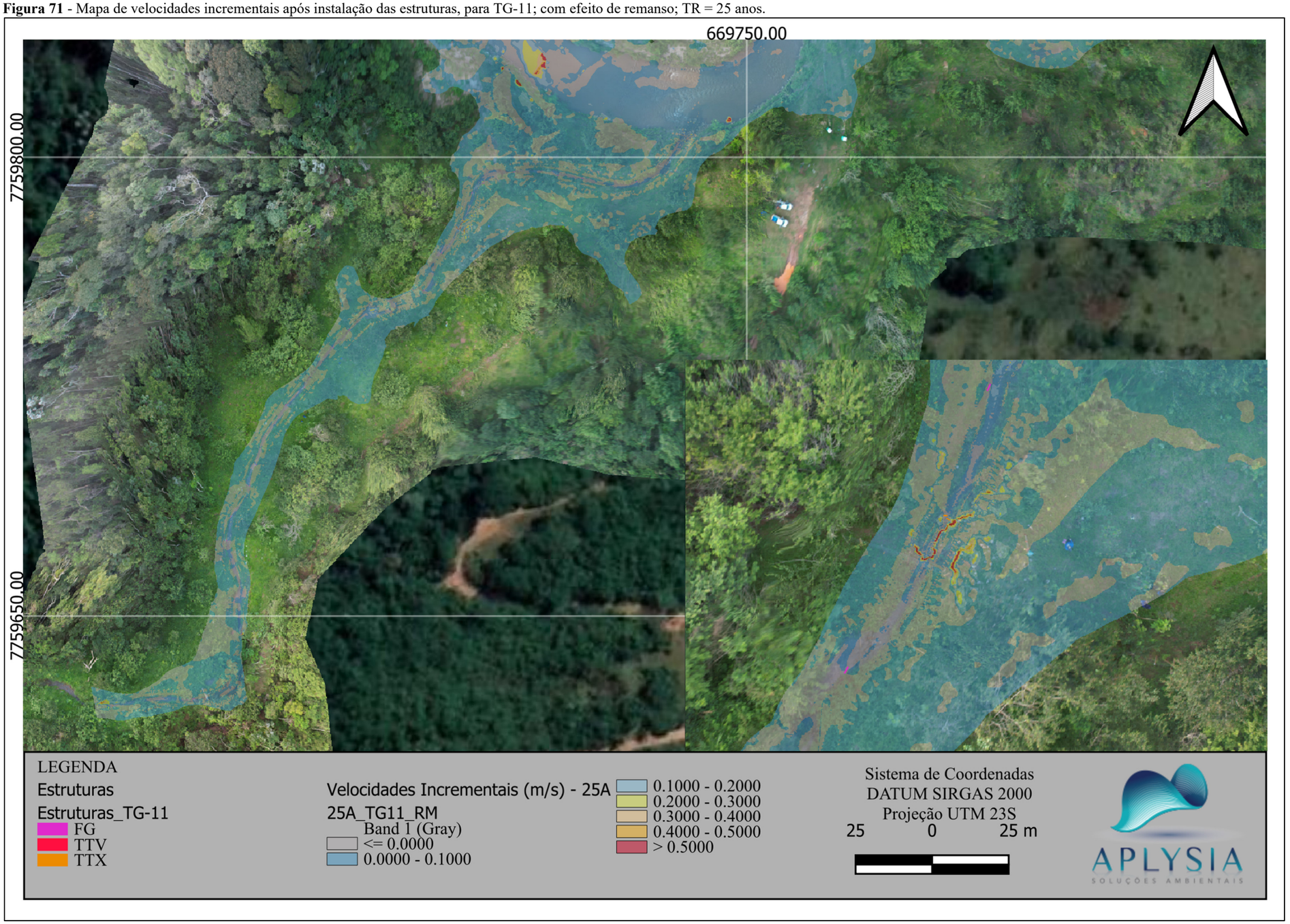
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 70 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; TR = 25 anos.



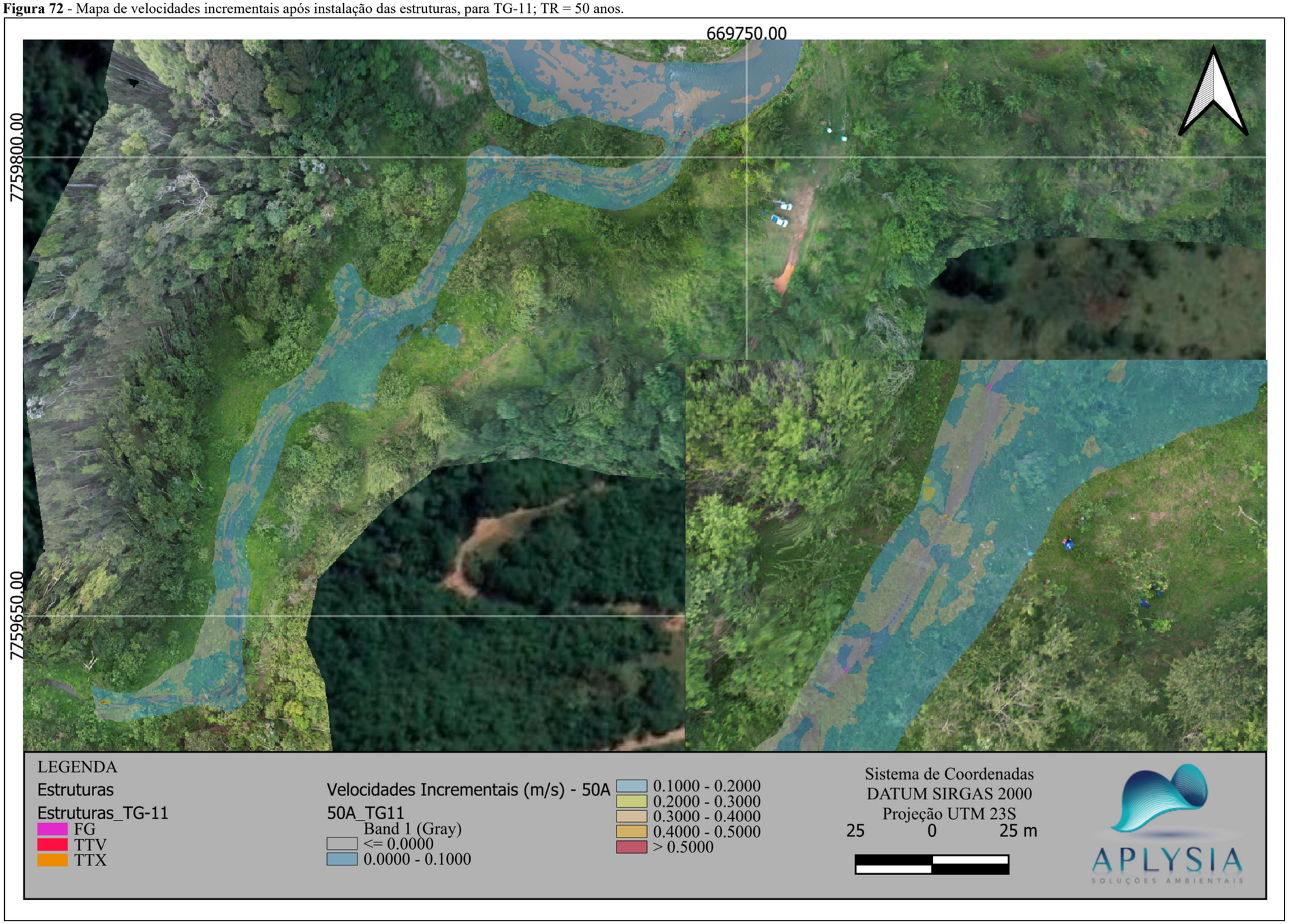
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 71 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; com efeito de remanso; TR = 25 anos.



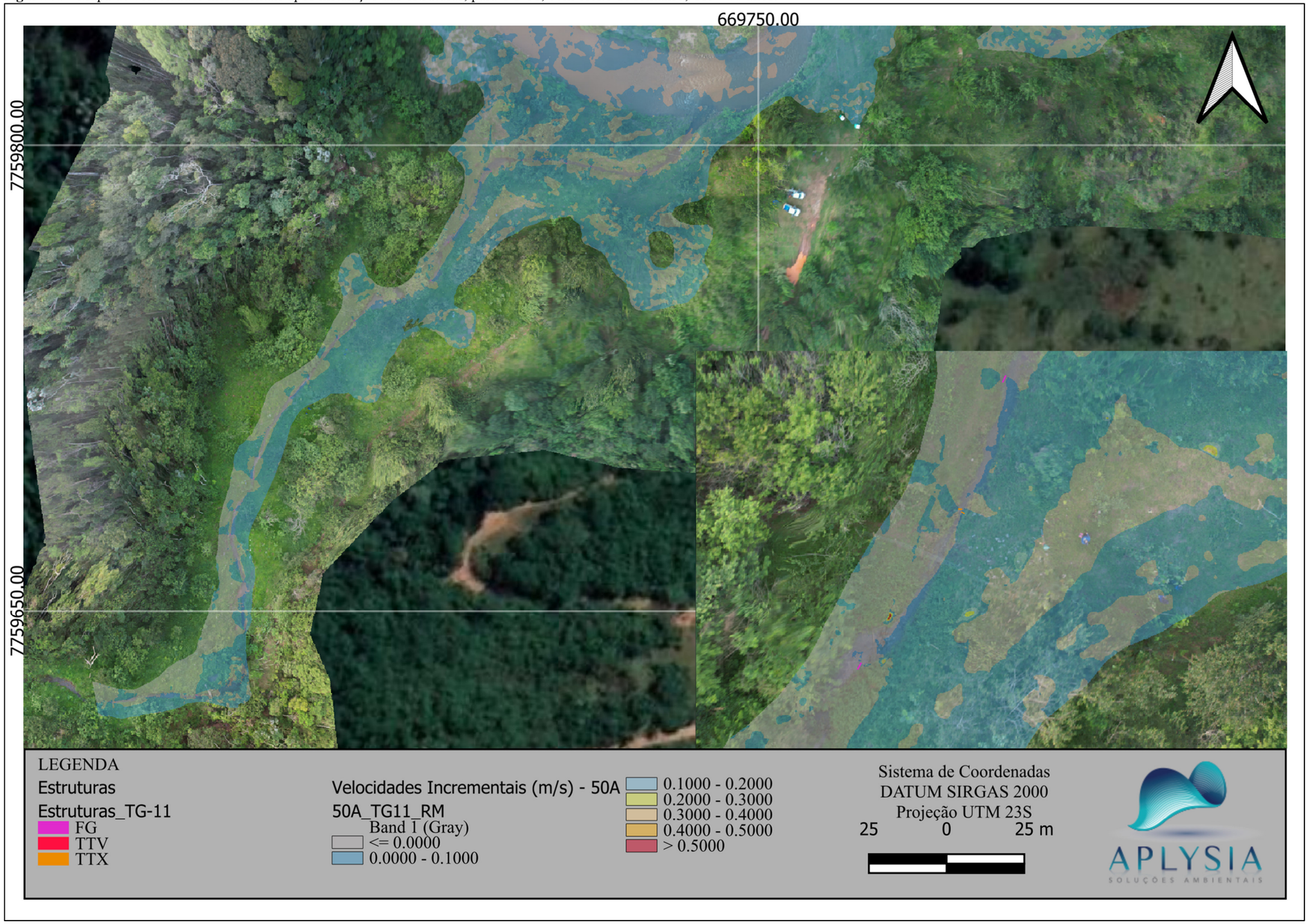
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 72 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; TR = 50 anos.



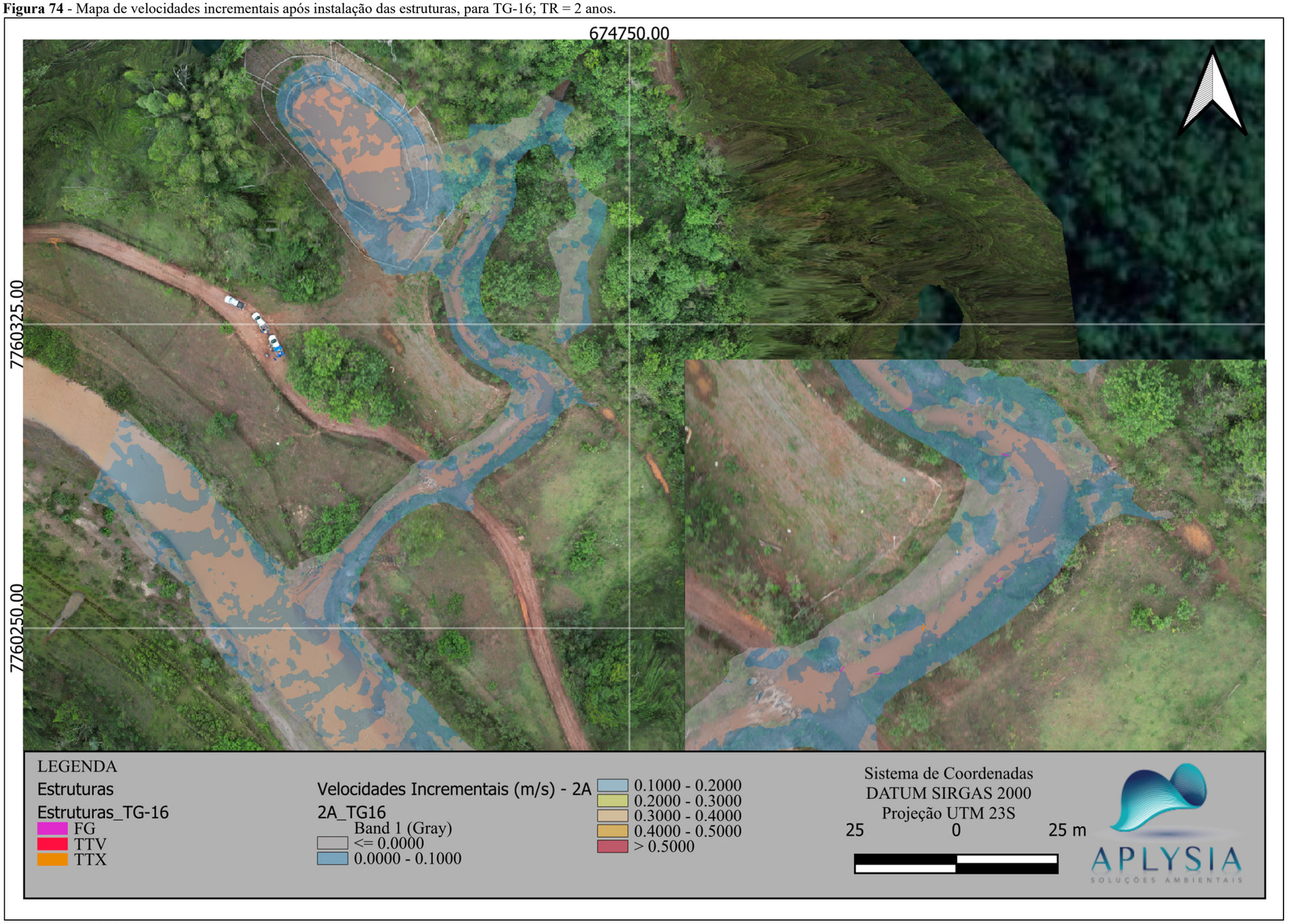
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 73 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-11; com efeito de remanso; TR = 50 anos.



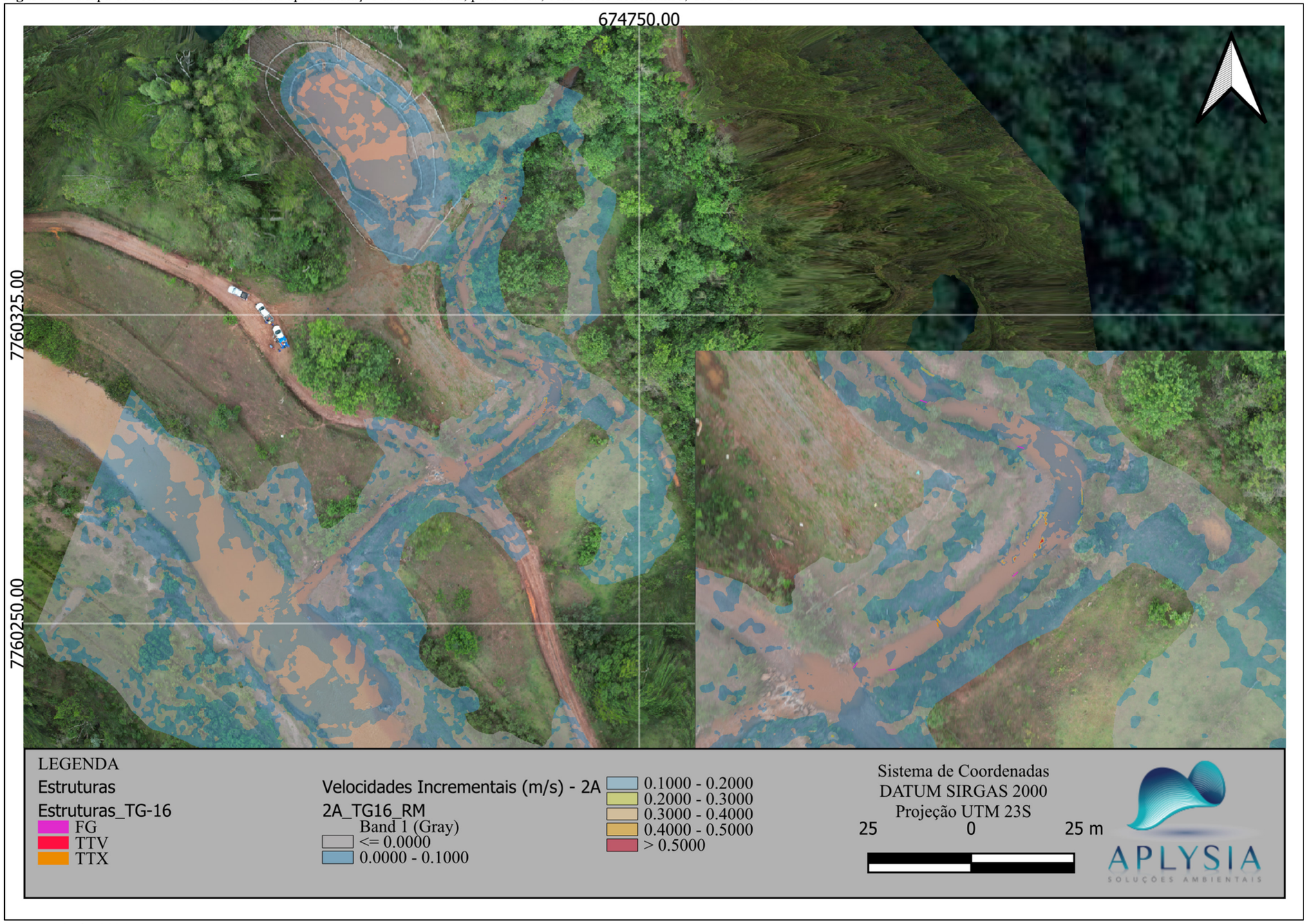
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 74 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; TR = 2 anos.



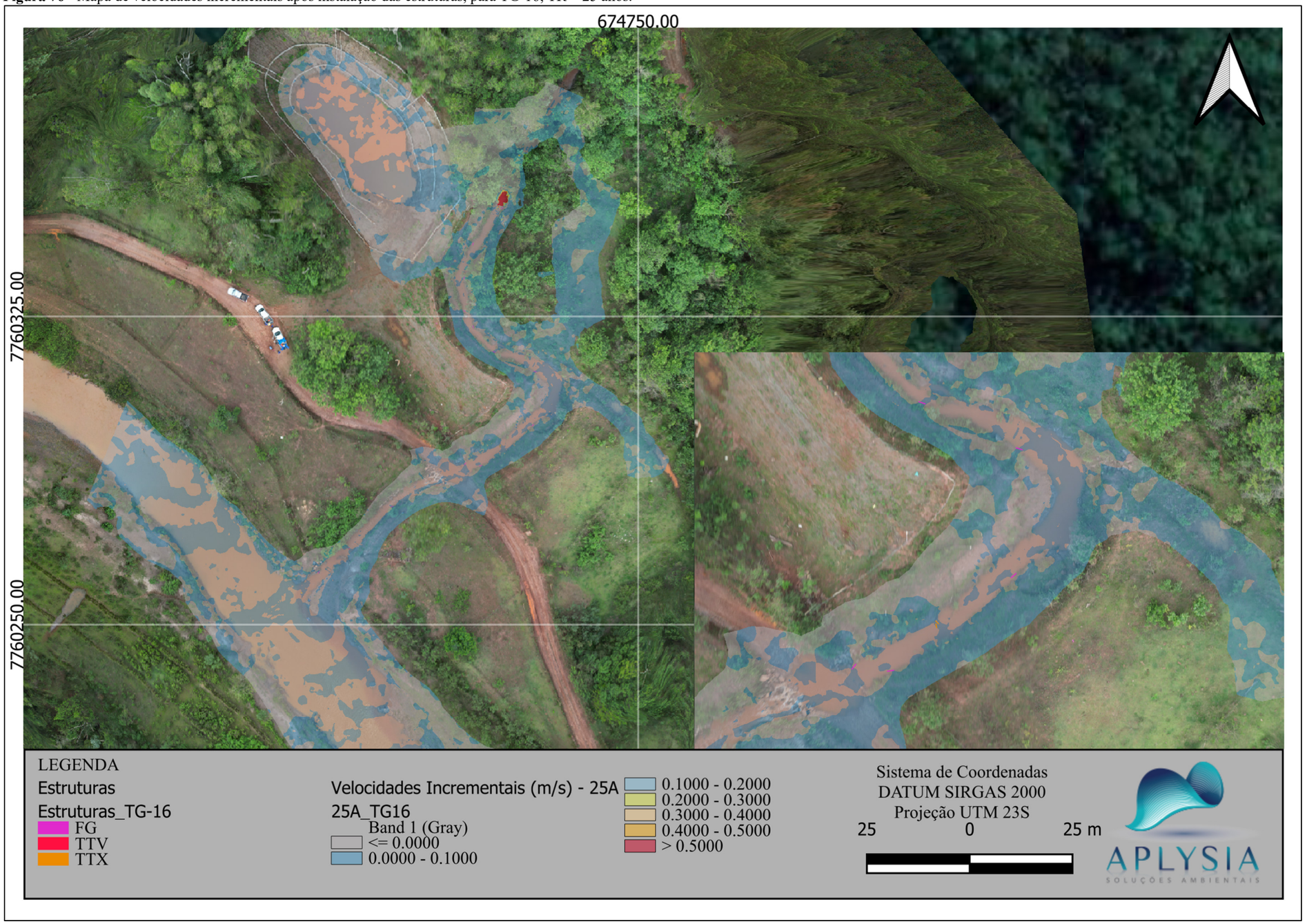
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 75 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; com efeito de remanso; TR = 2 anos.



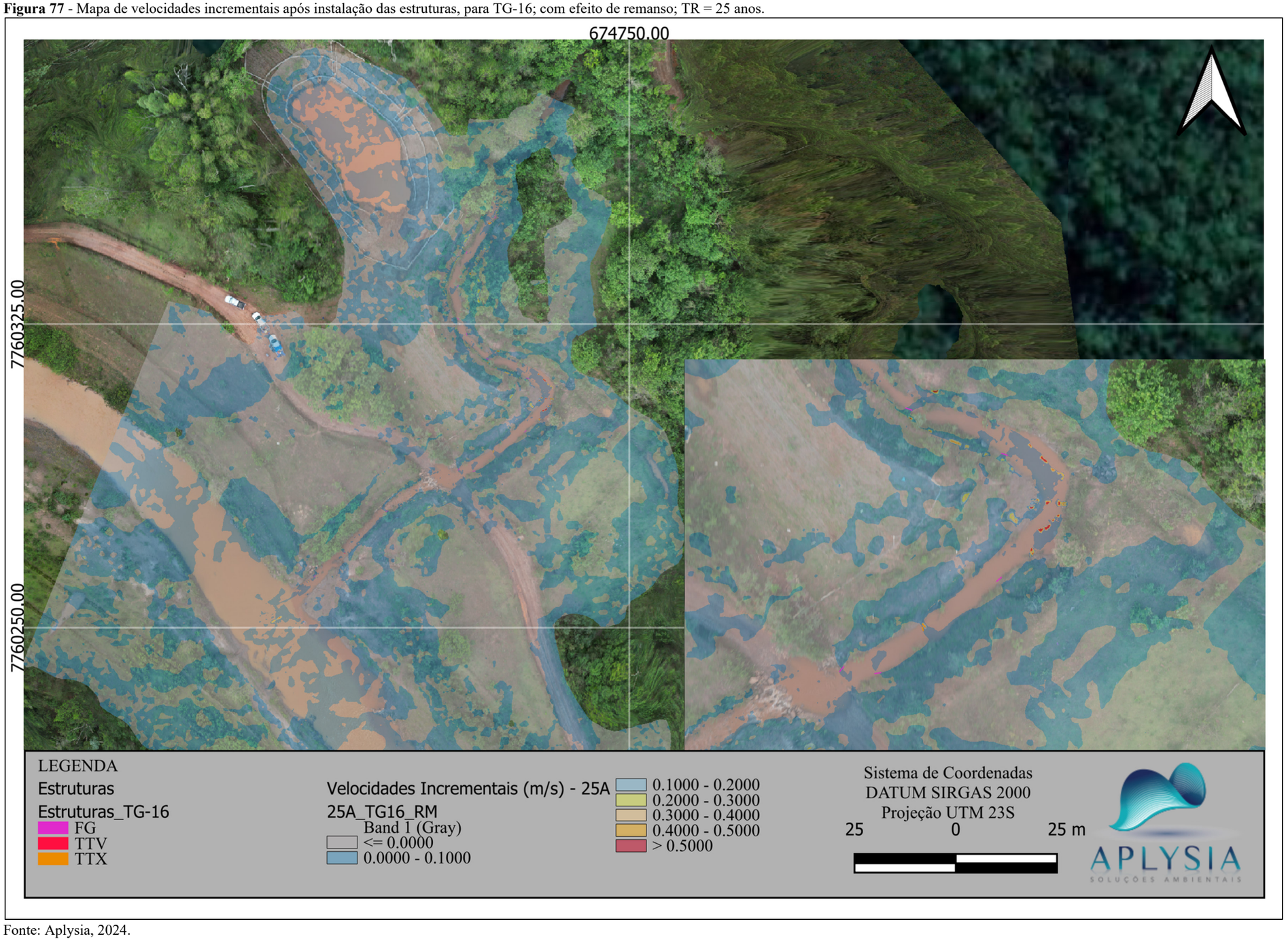
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 76 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; TR = 25 anos.



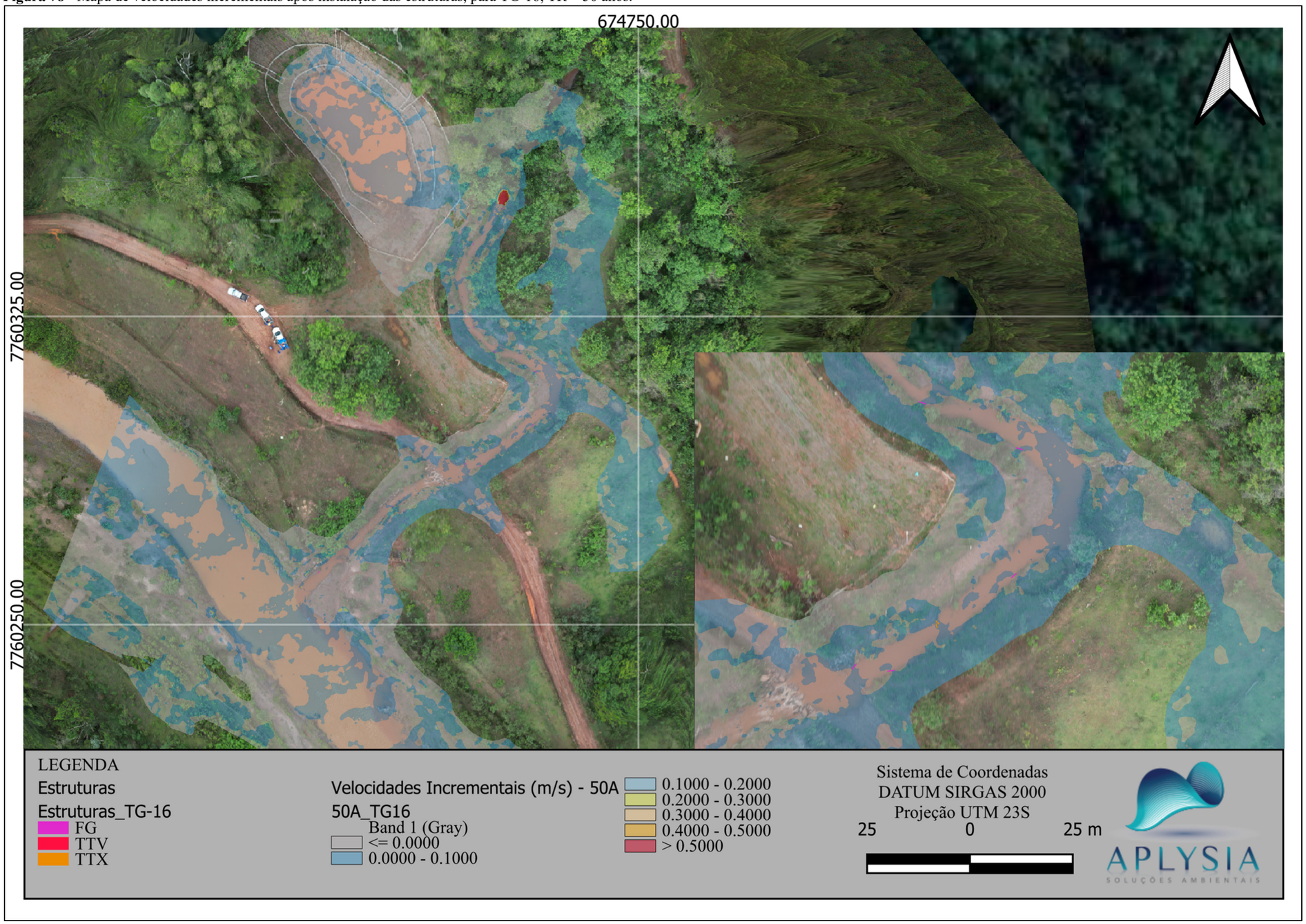
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 77 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; com efeito de remanso; TR = 25 anos.



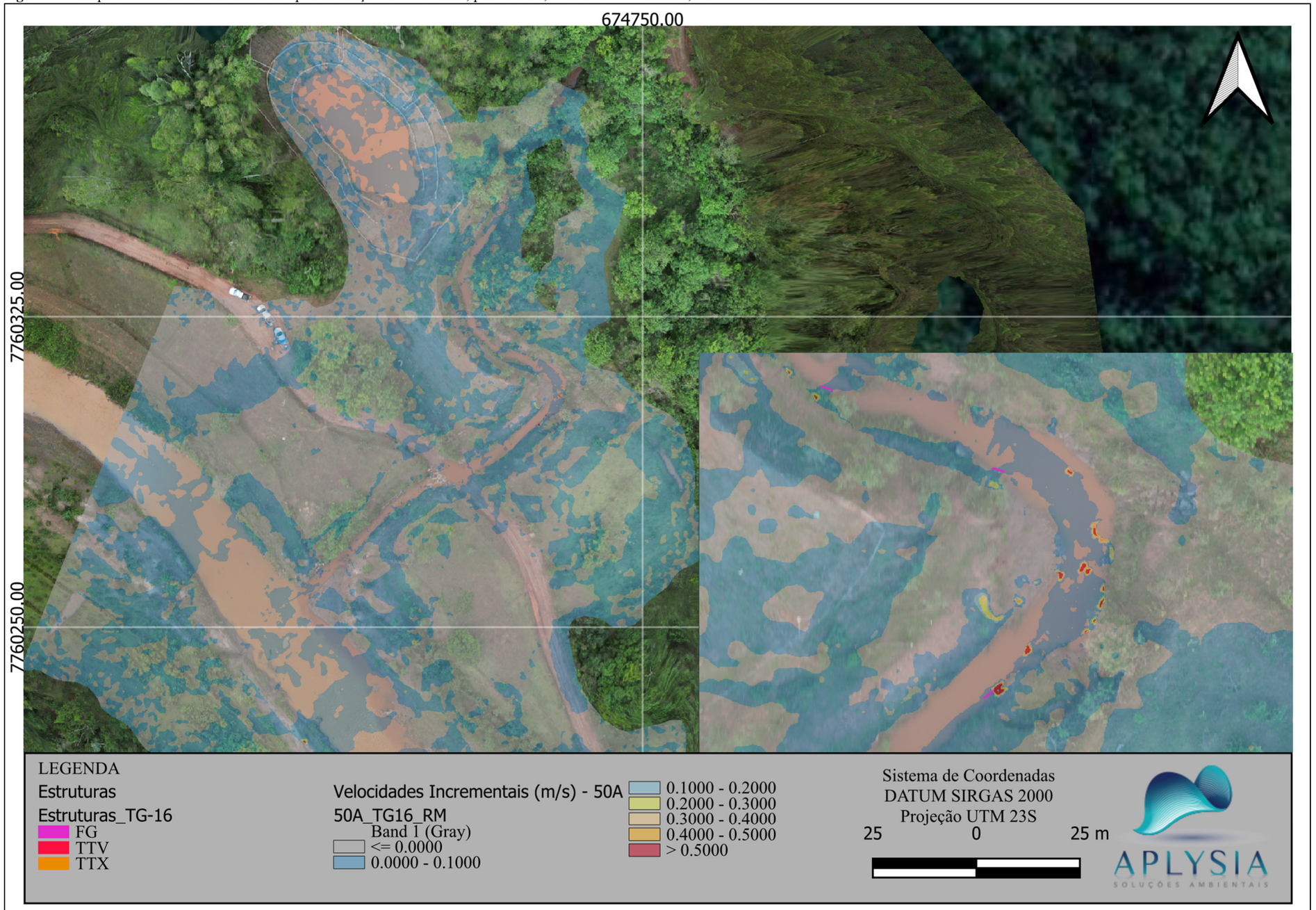
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 78 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; TR = 50 anos.



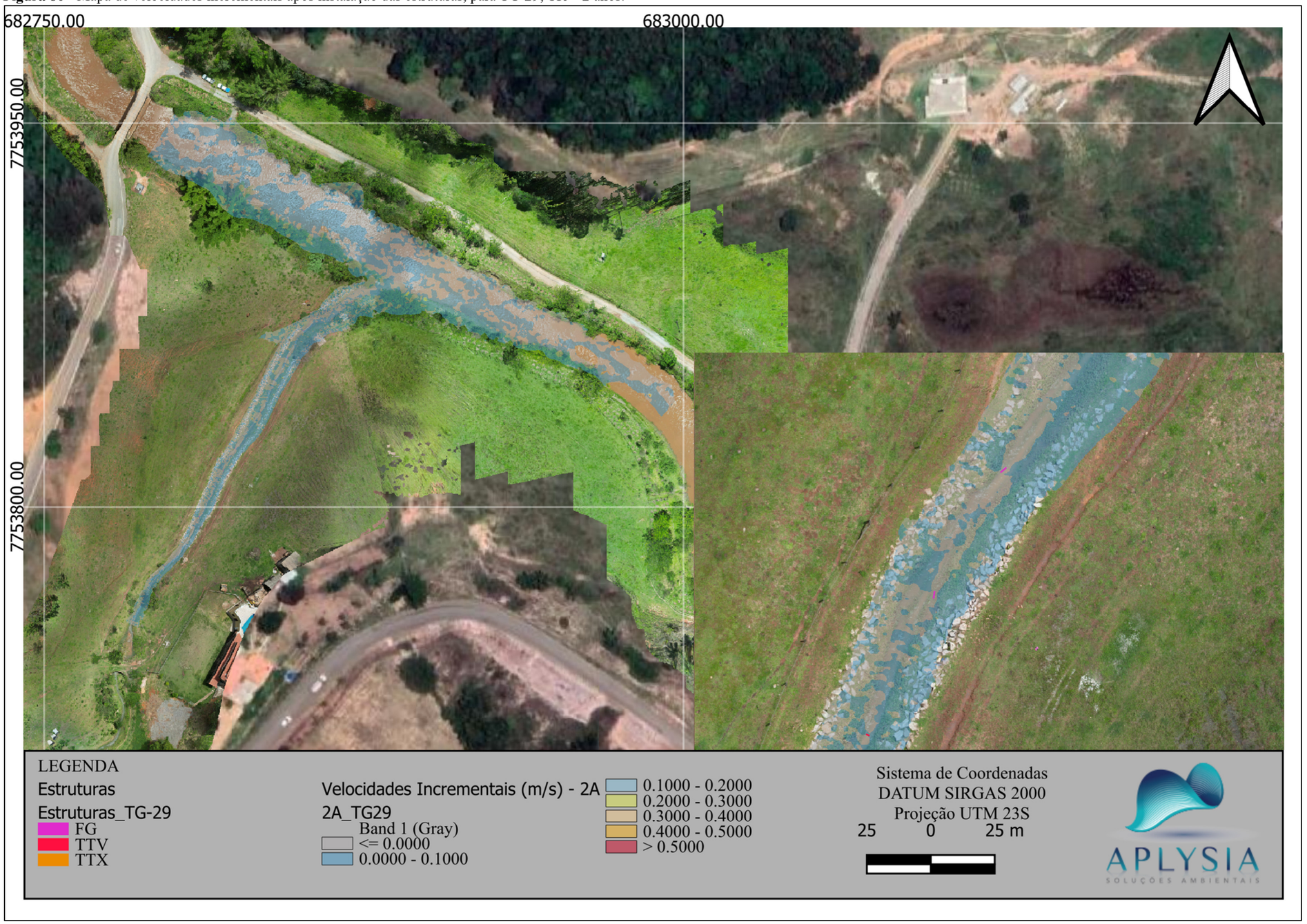
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 79 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-16; com efeito de remanso; TR = 50 anos.



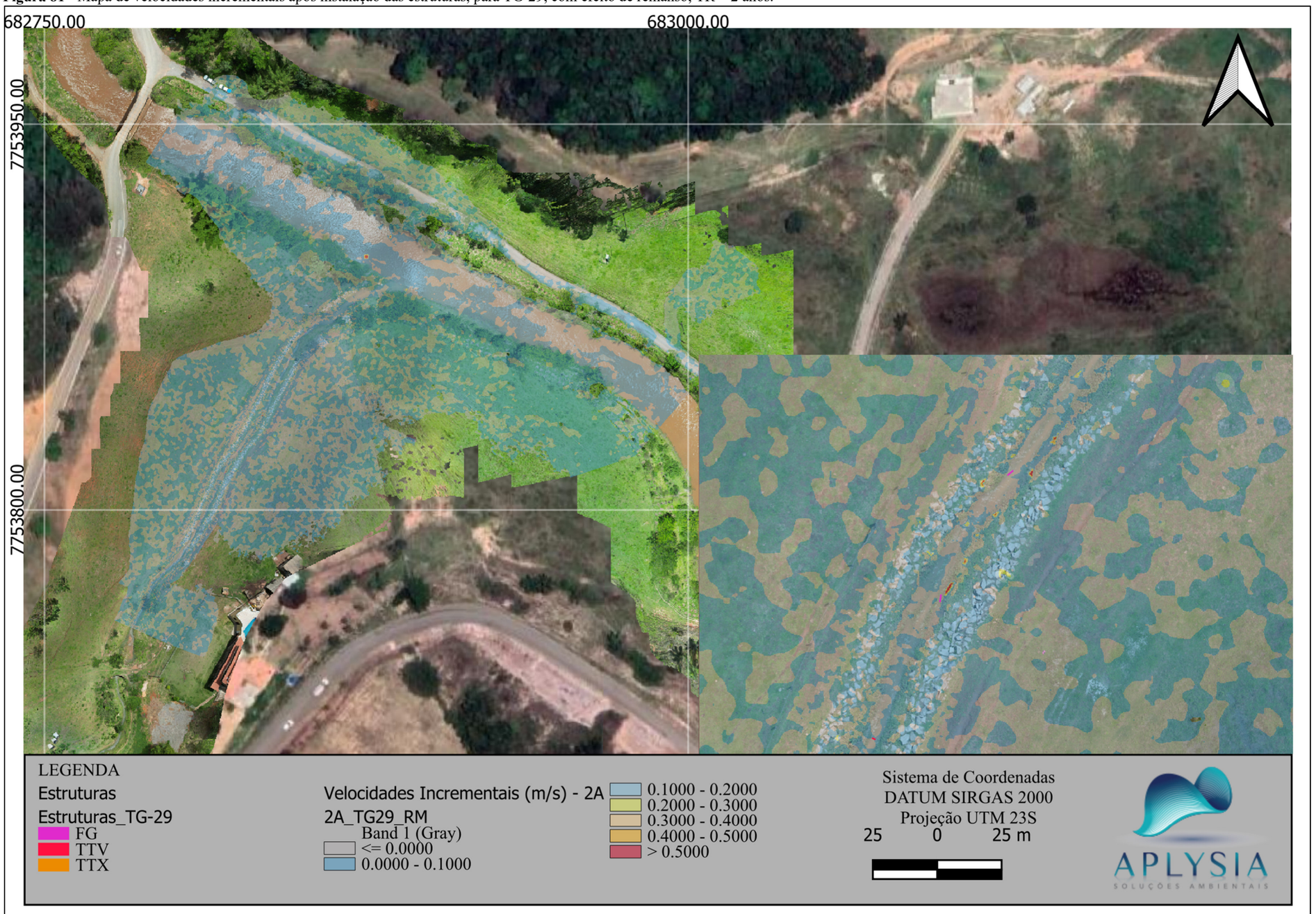
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 80 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; TR = 2 anos.



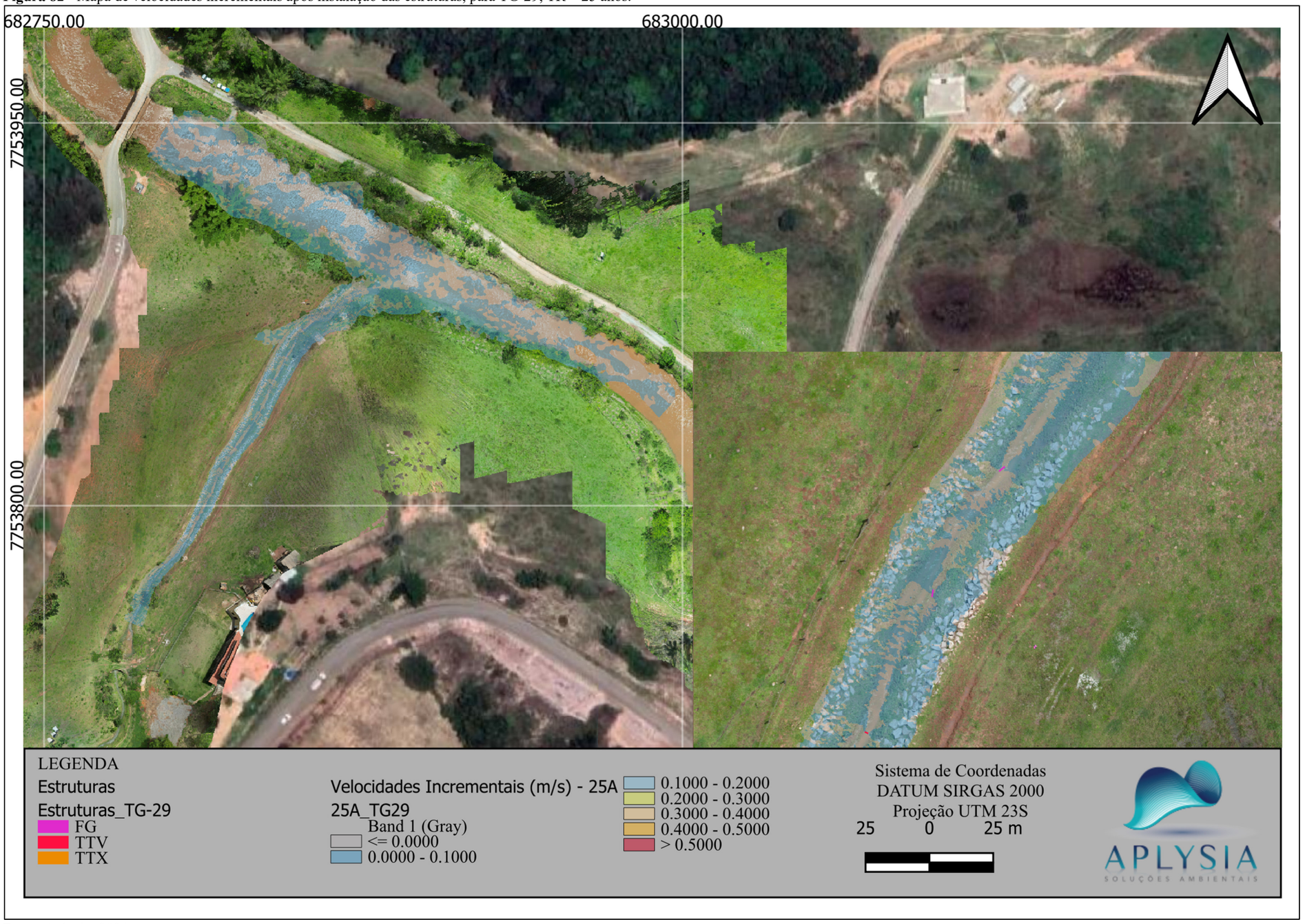
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 81 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; com efeito de remanso; TR = 2 anos.



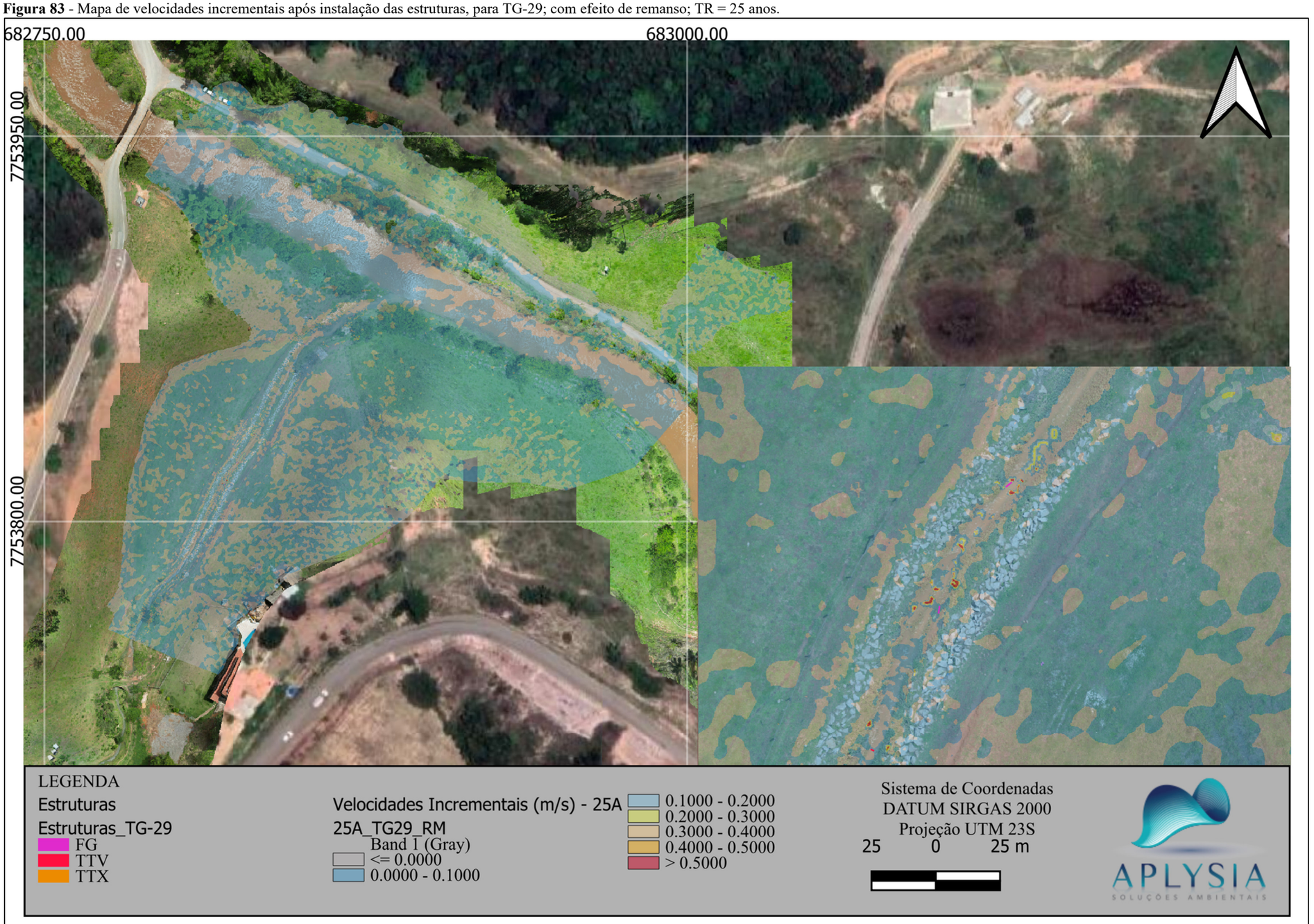
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 82 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; TR = 25 anos.



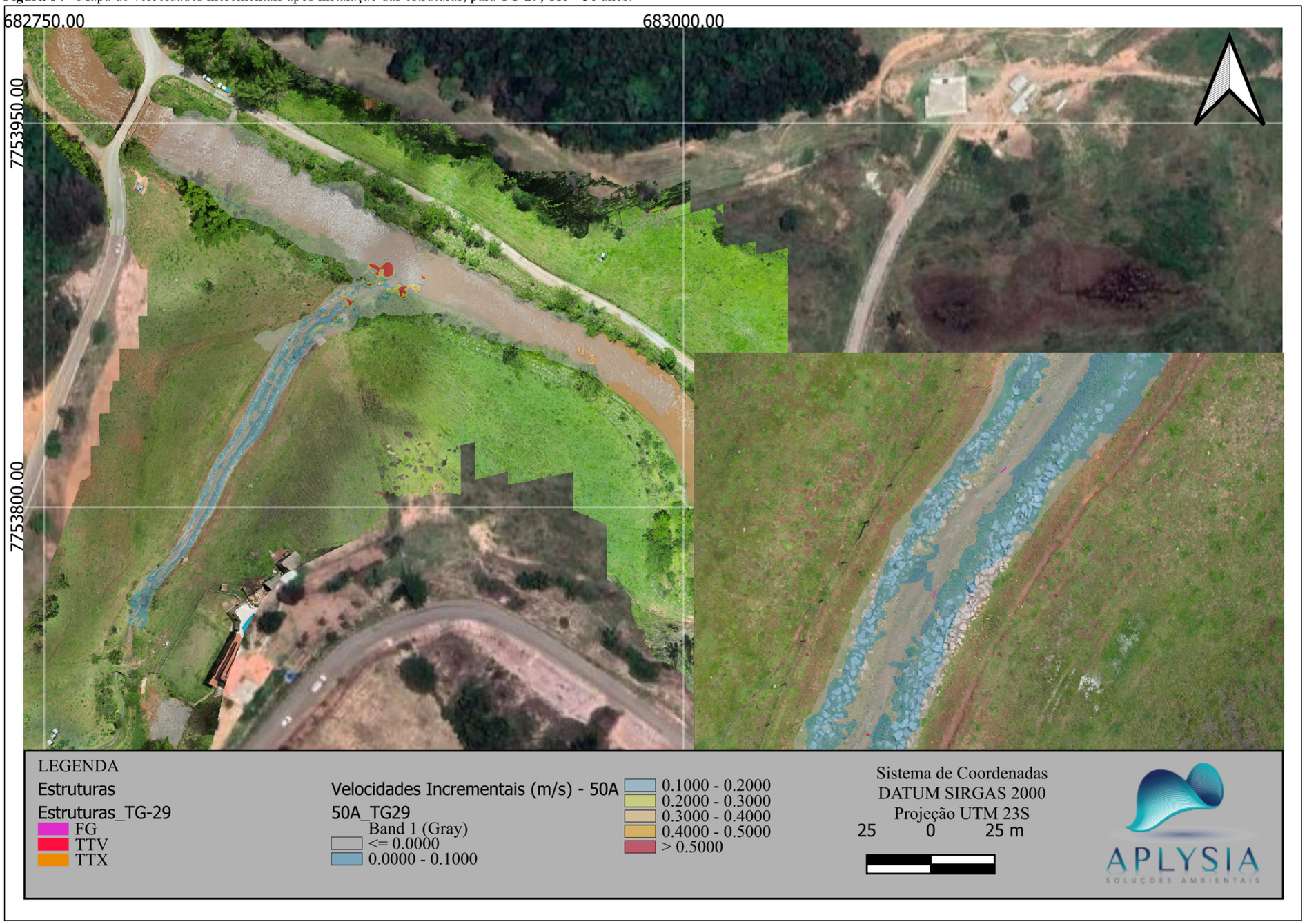
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 83 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; com efeito de remanso; TR = 25 anos.



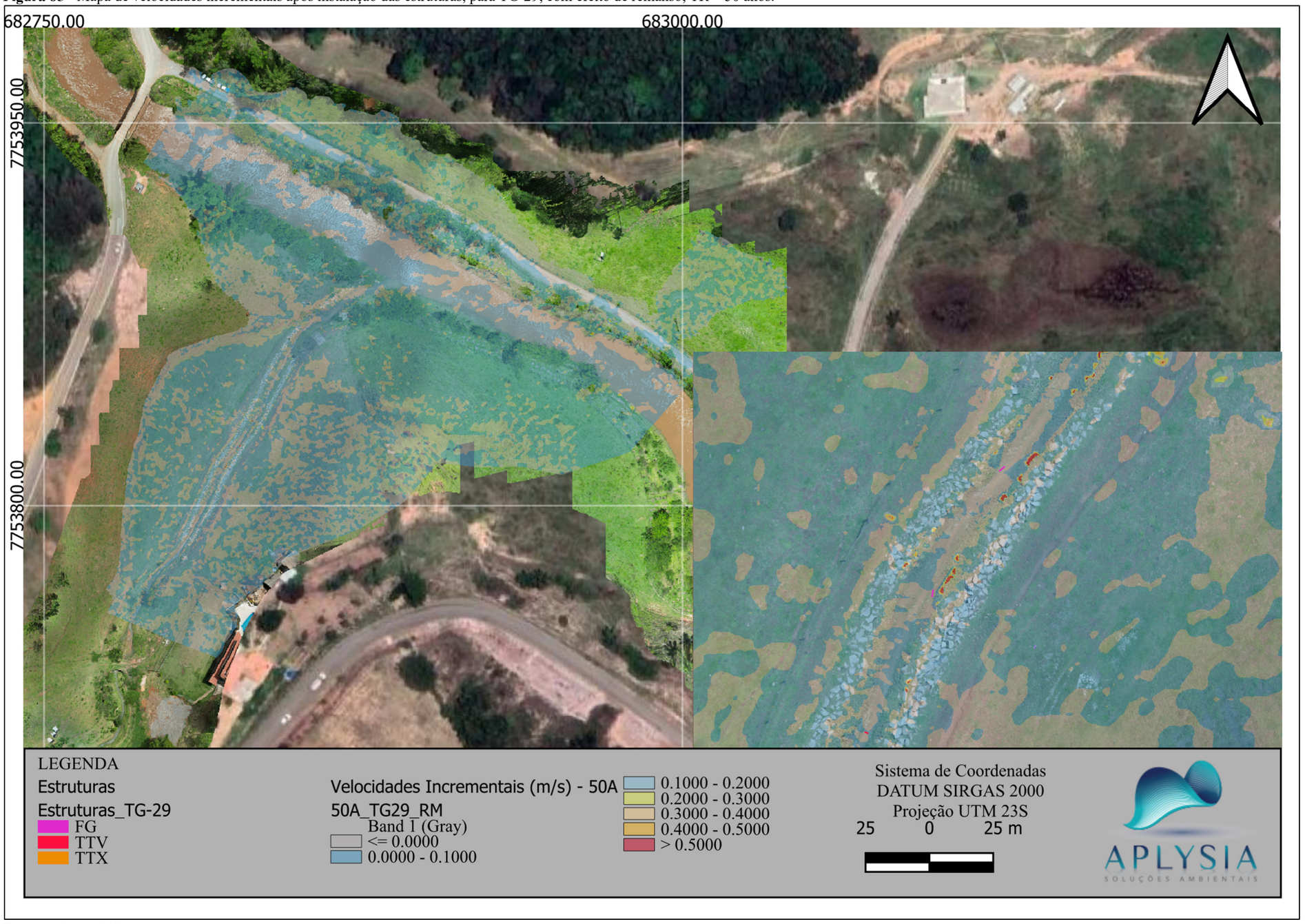
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 84 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; TR = 50 anos.



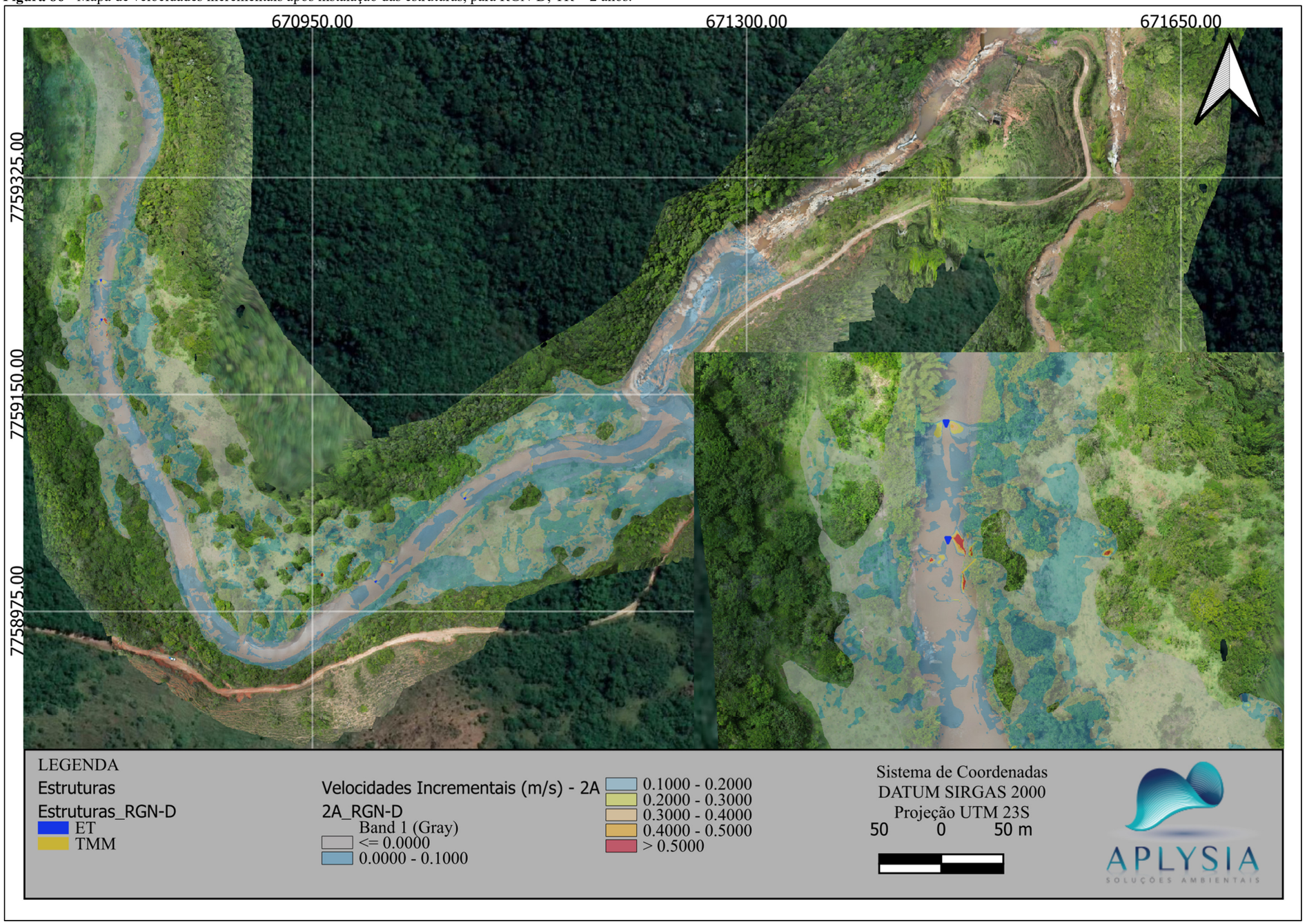
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 85 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para TG-29; com efeito de remanso; TR = 50 anos.



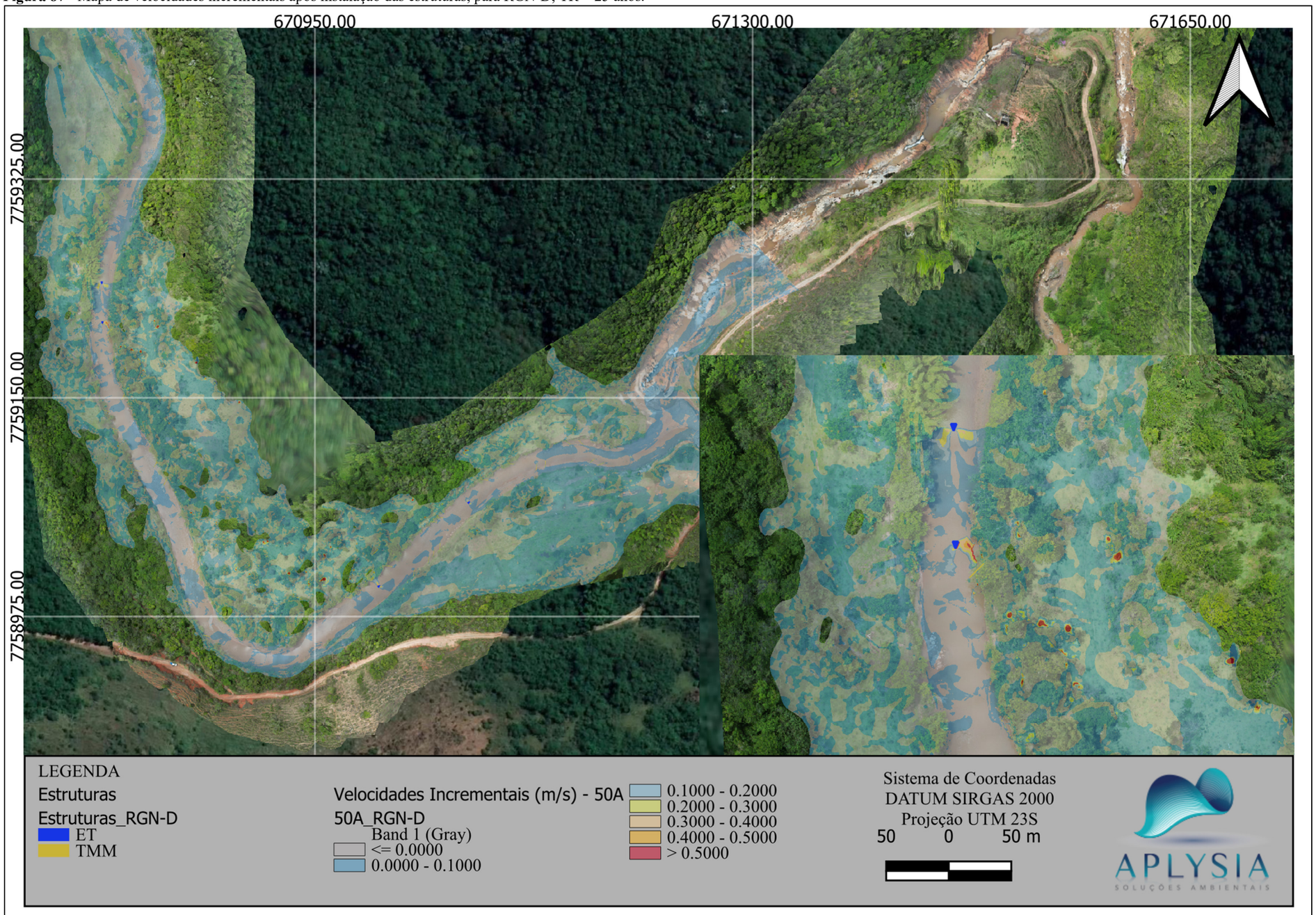
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 86 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-D; TR = 2 anos.



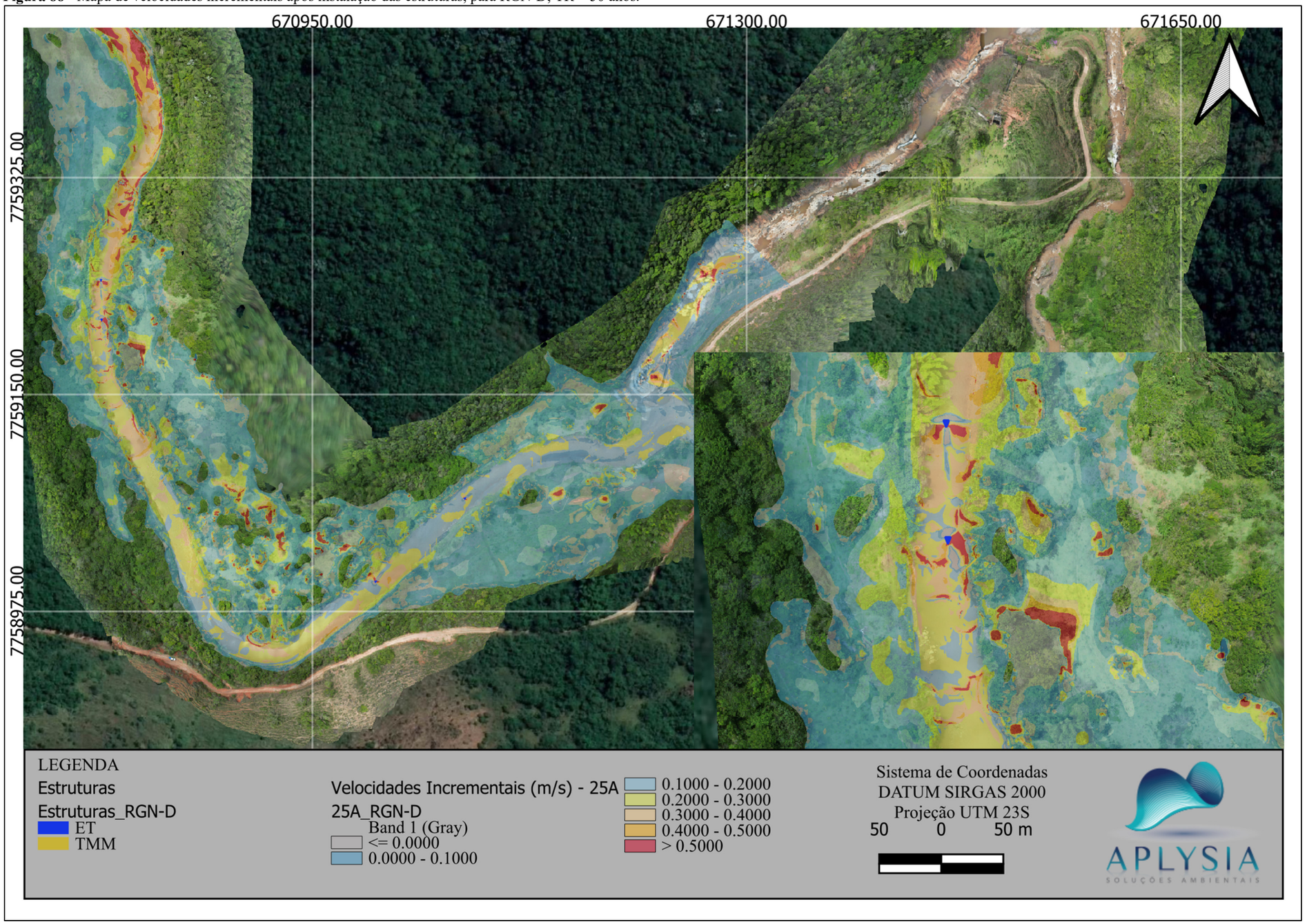
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 87 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-D; TR = 25 anos.



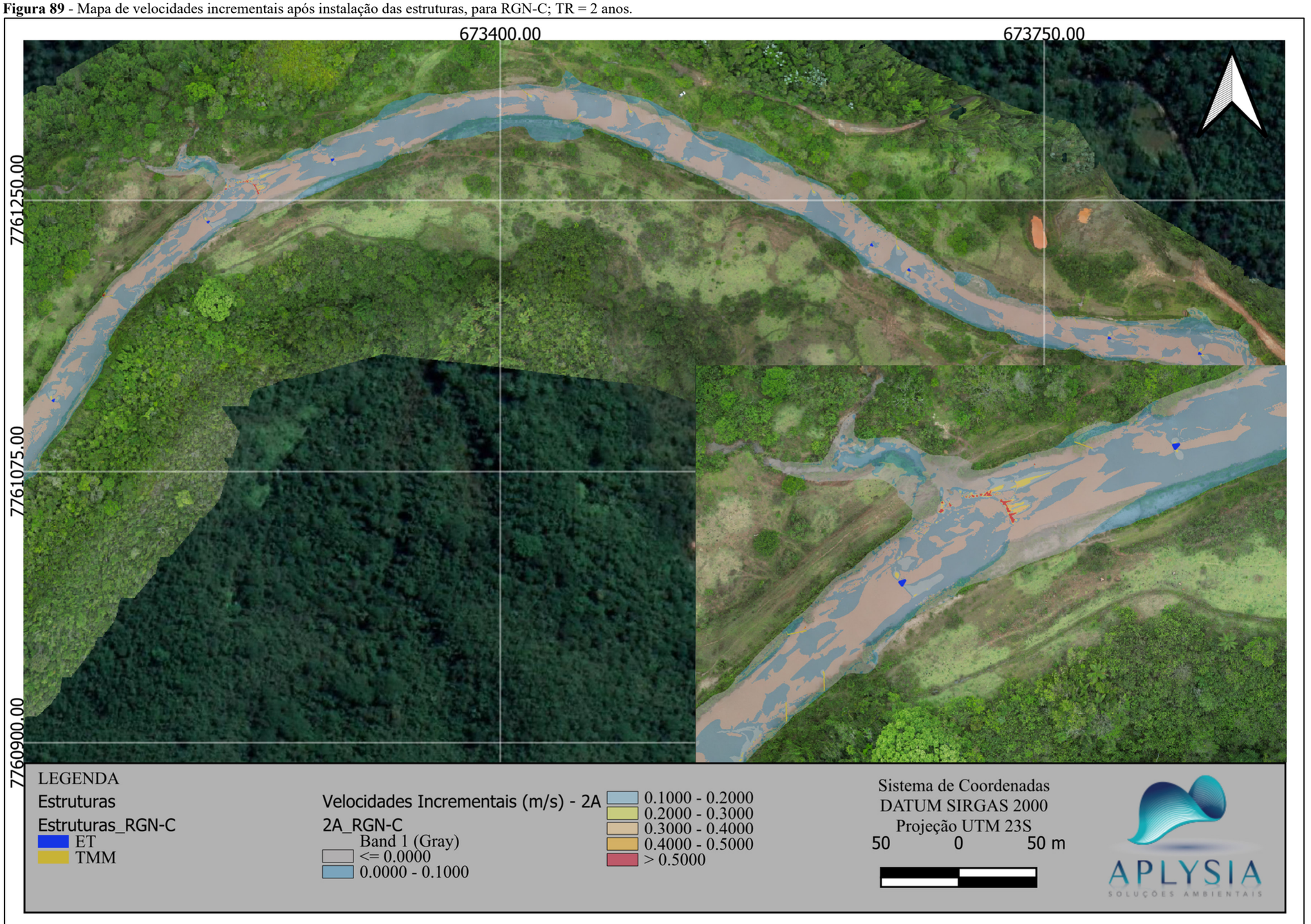
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 88 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-D; TR = 50 anos.



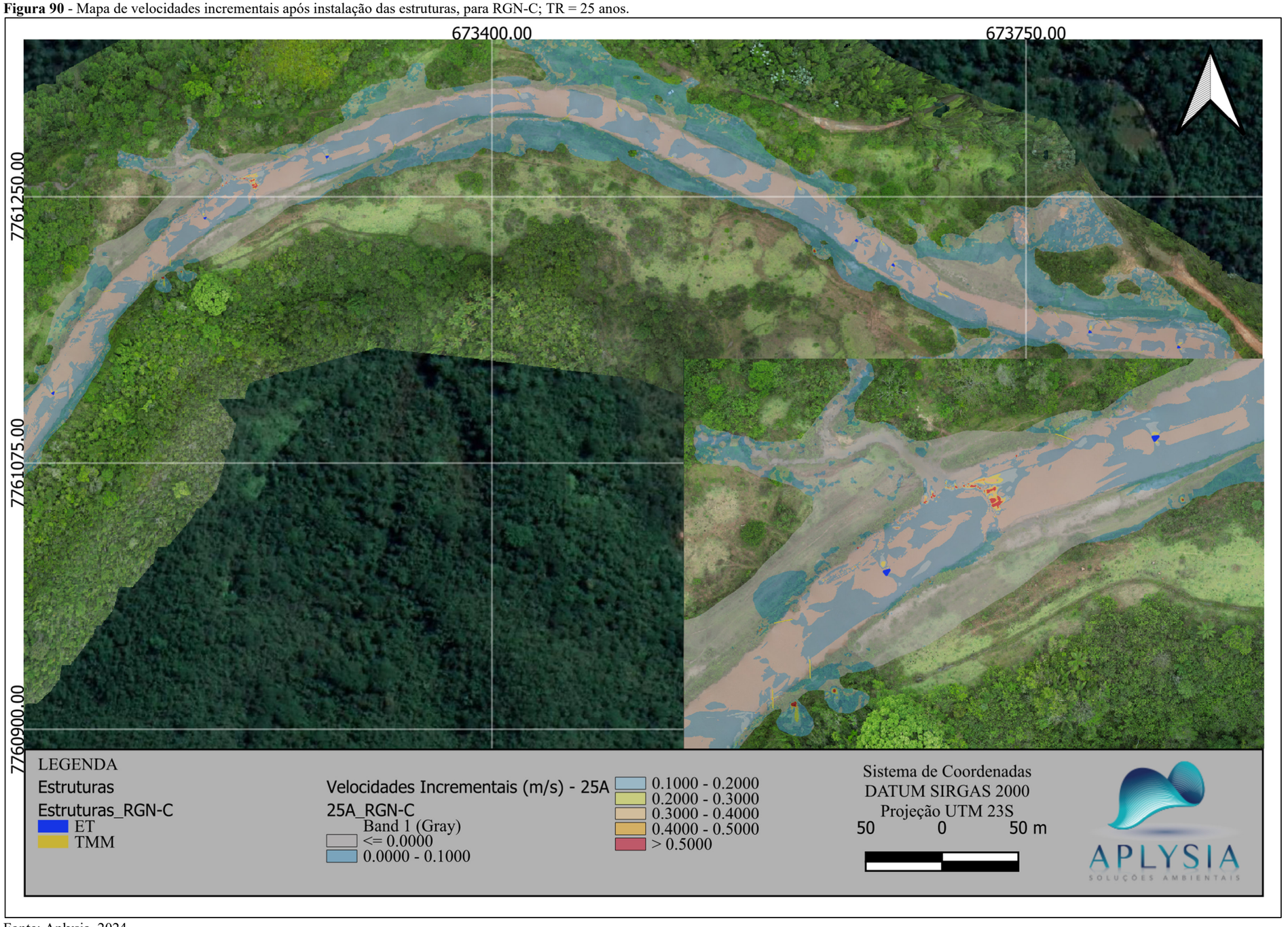
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 89 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-C; TR = 2 anos.



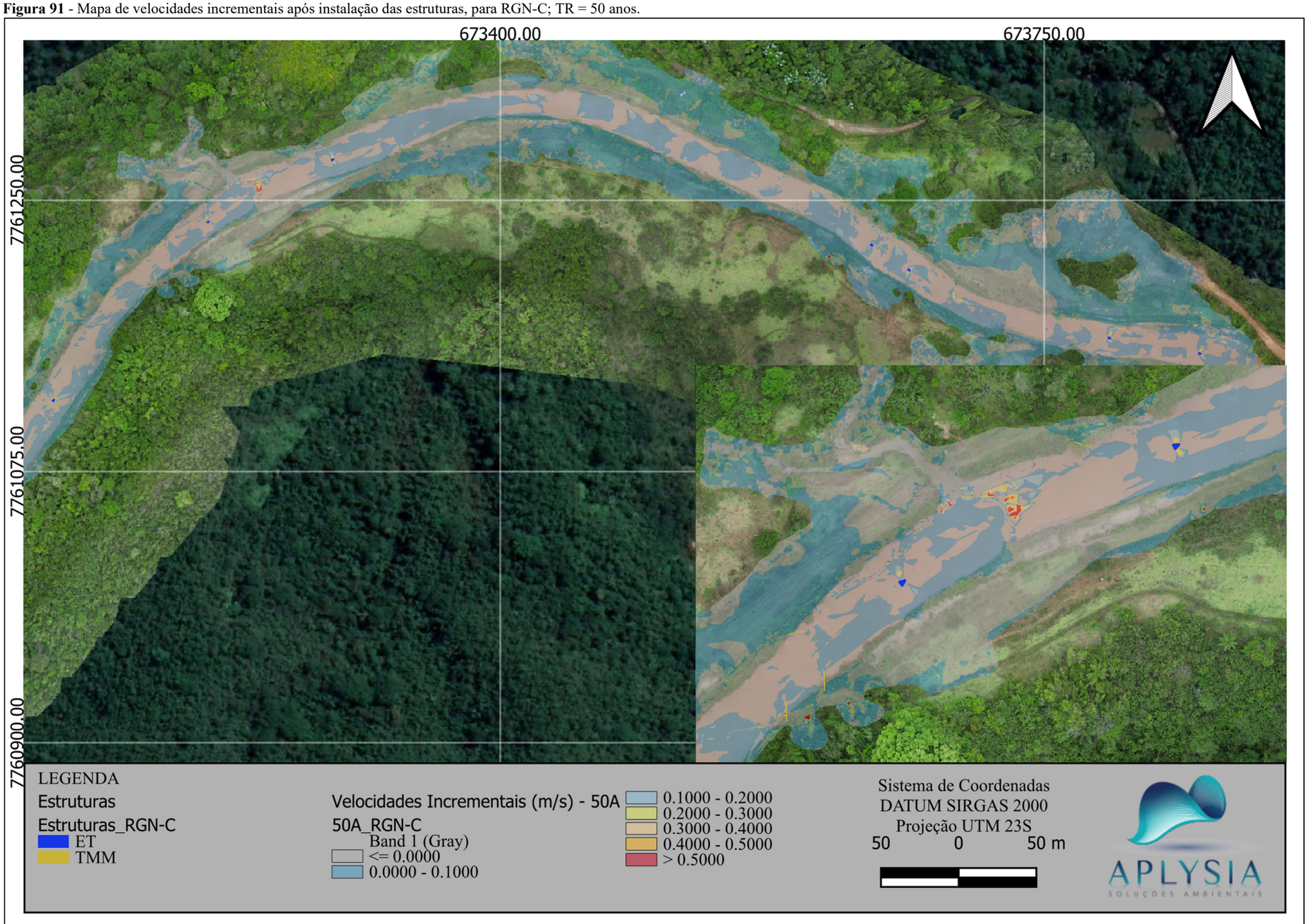
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 90 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-C; TR = 25 anos.



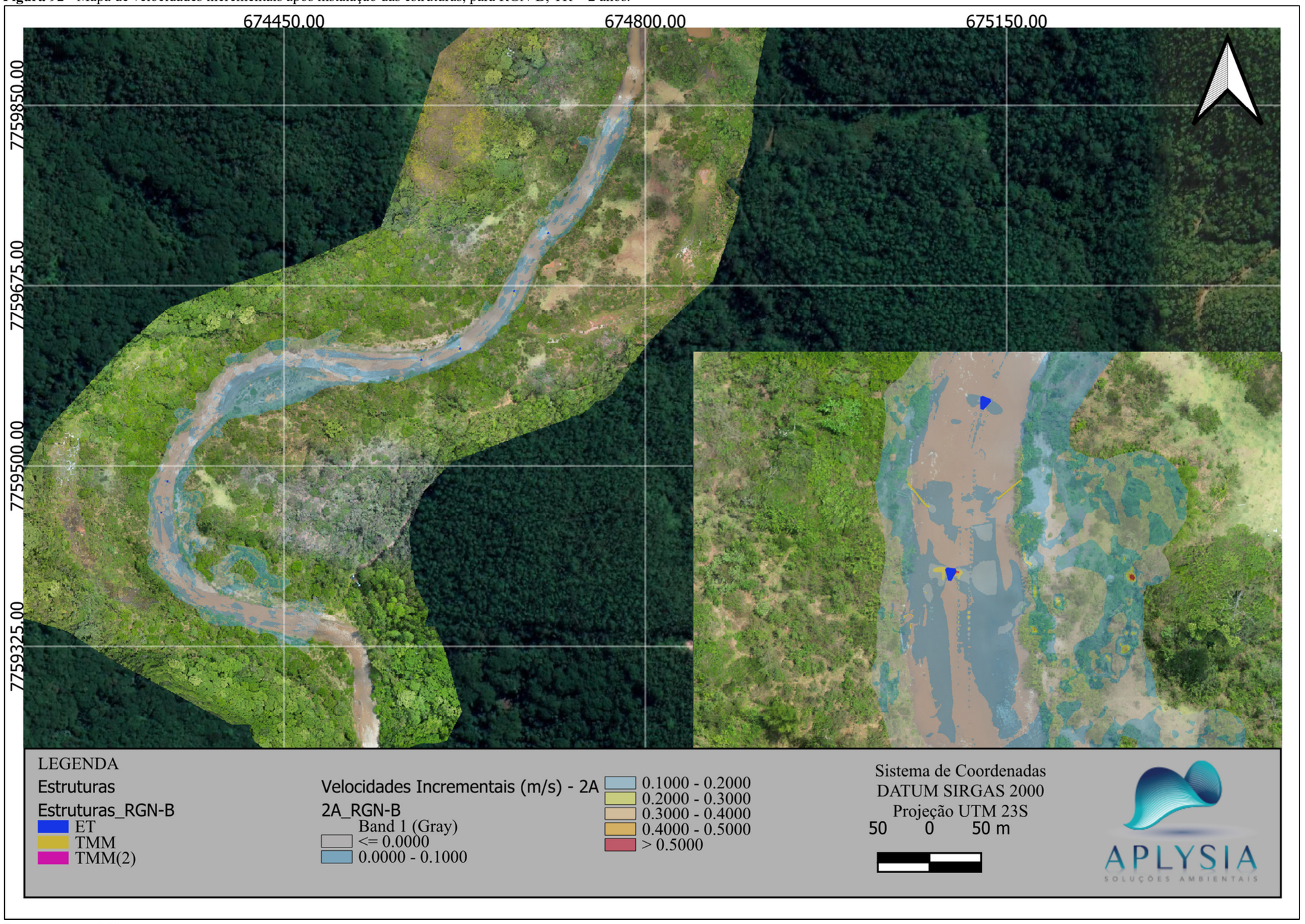
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 91 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-C; TR = 50 anos.



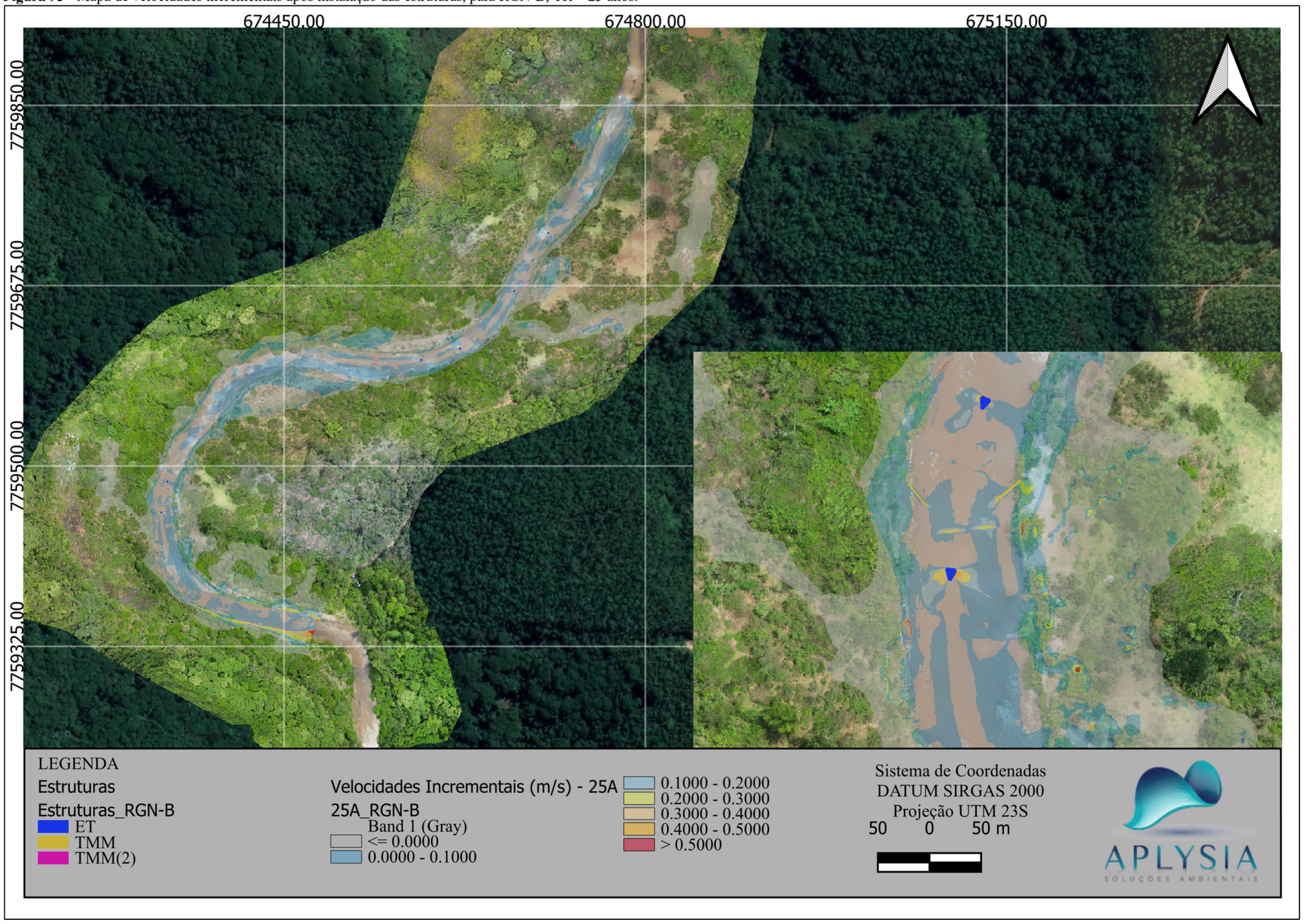
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 92 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-B; TR = 2 anos.



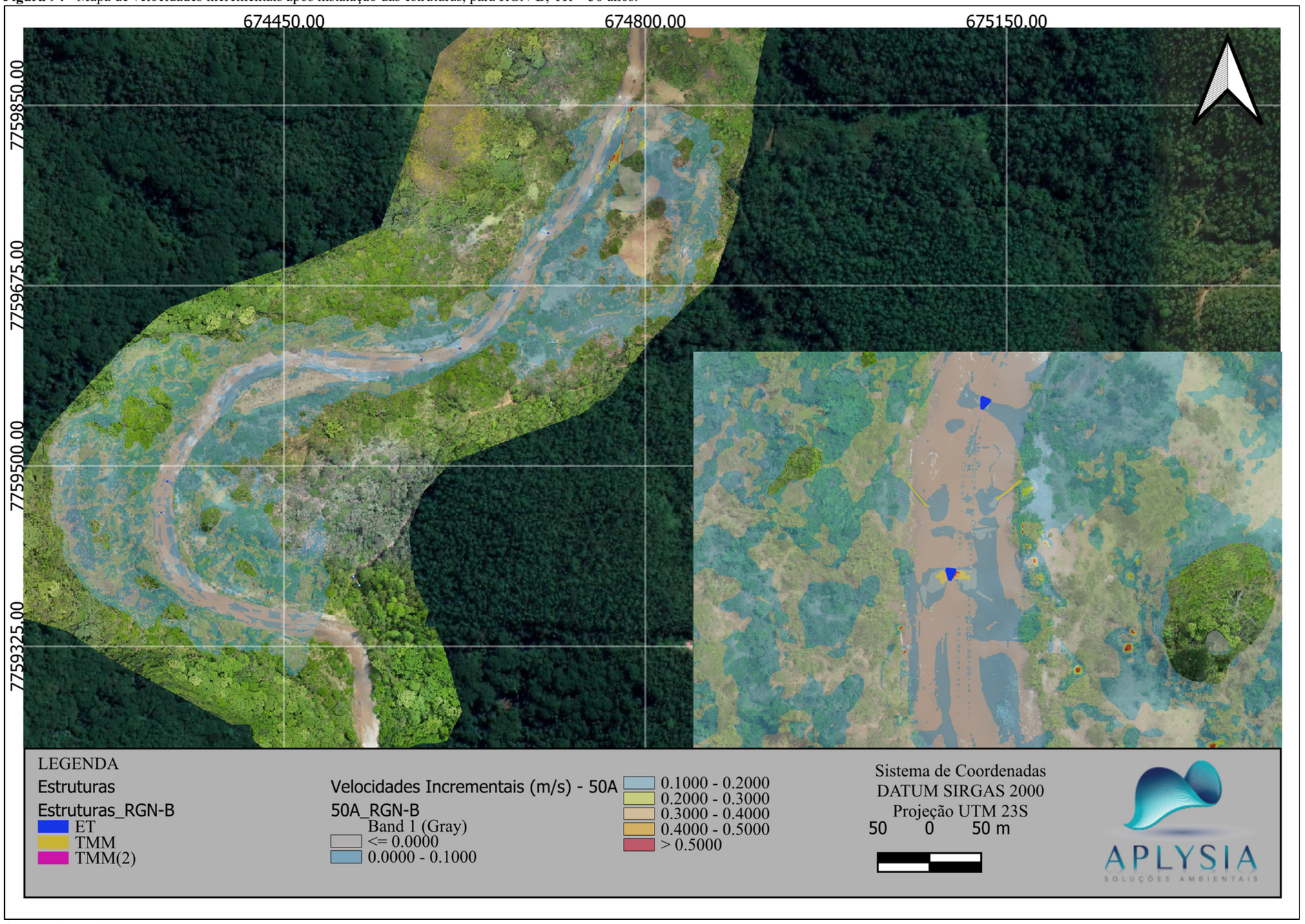
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 93 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-B; TR = 25 anos.



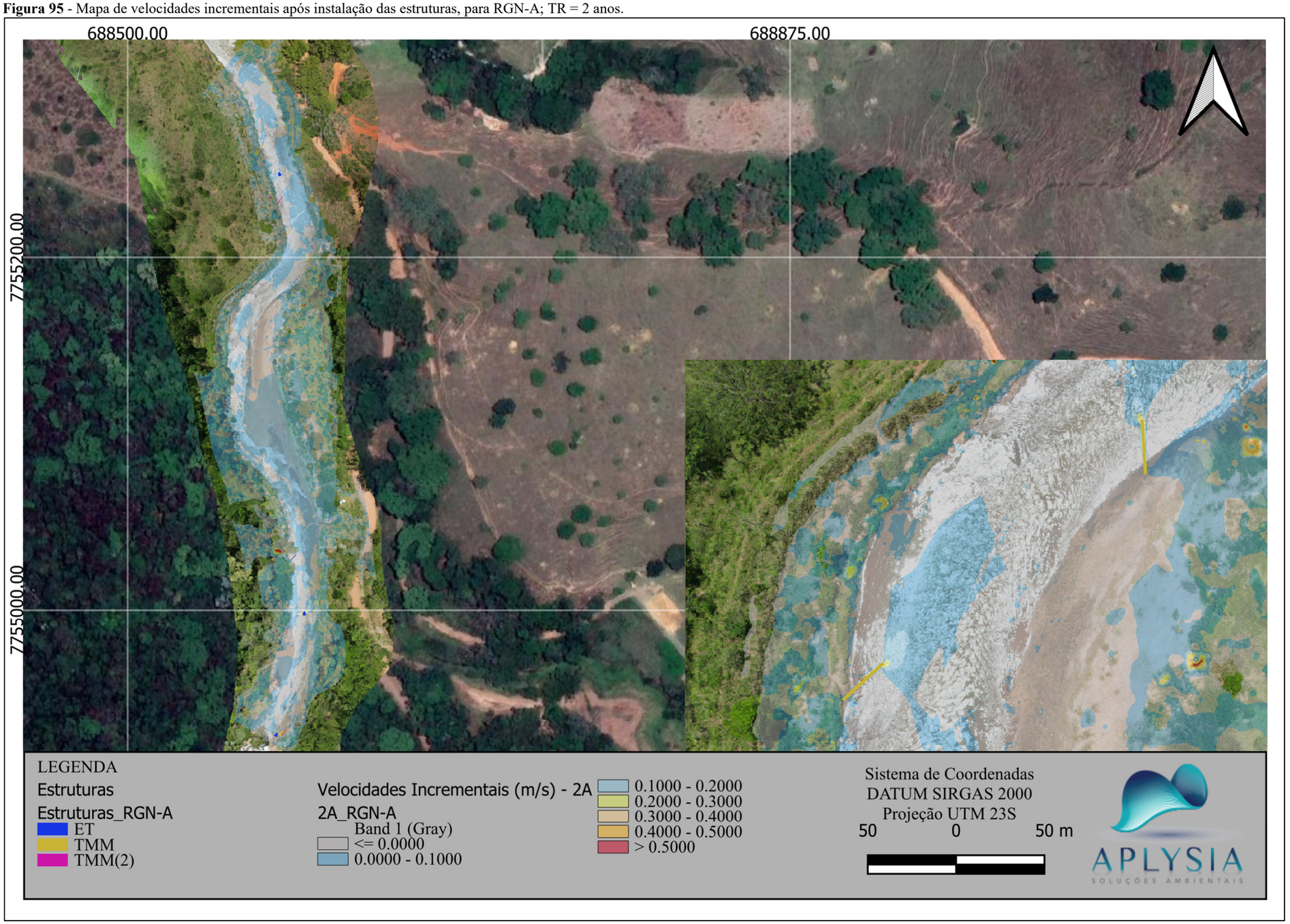
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 94 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-B; TR = 50 anos.



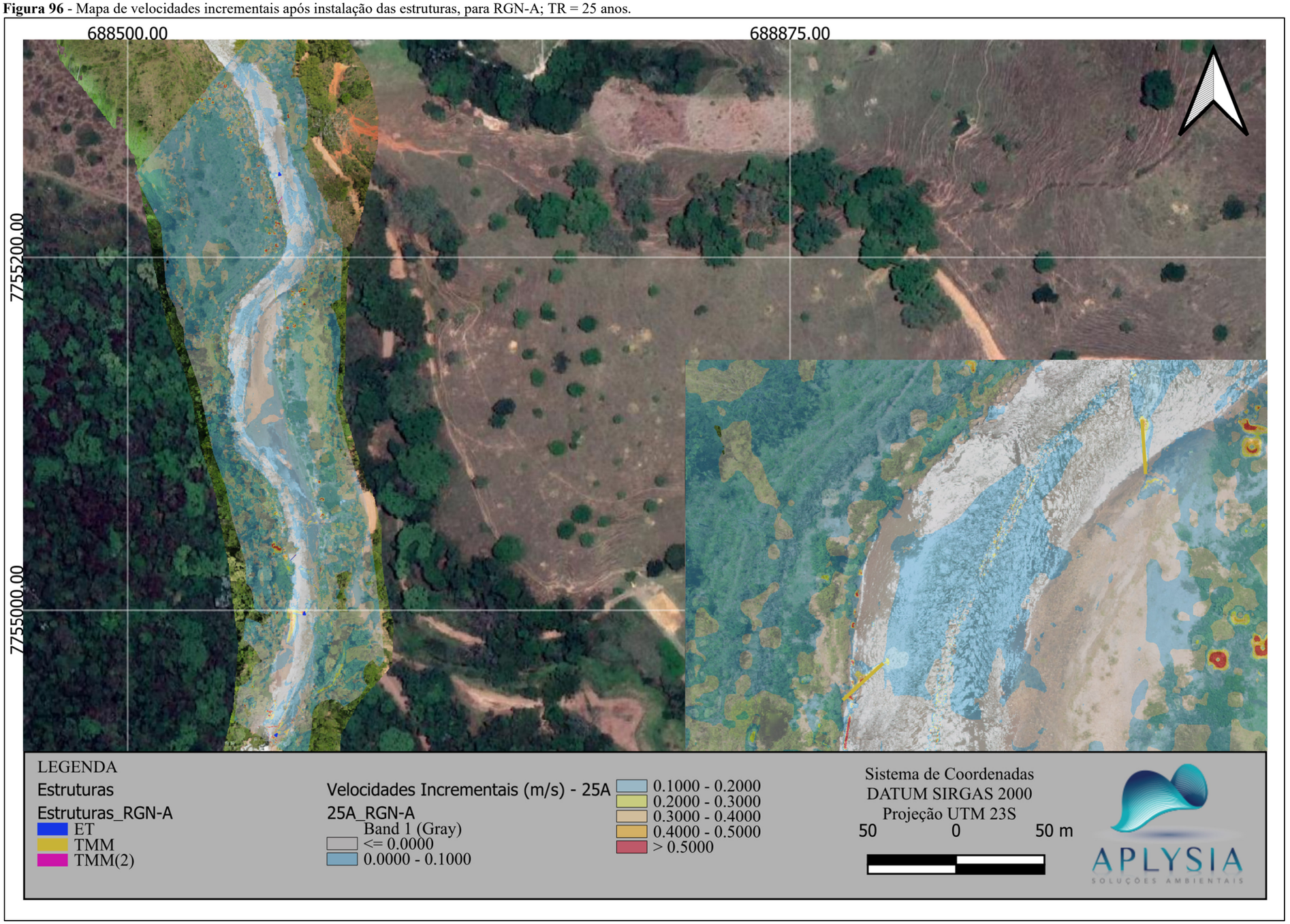
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 95 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-A; TR = 2 anos.



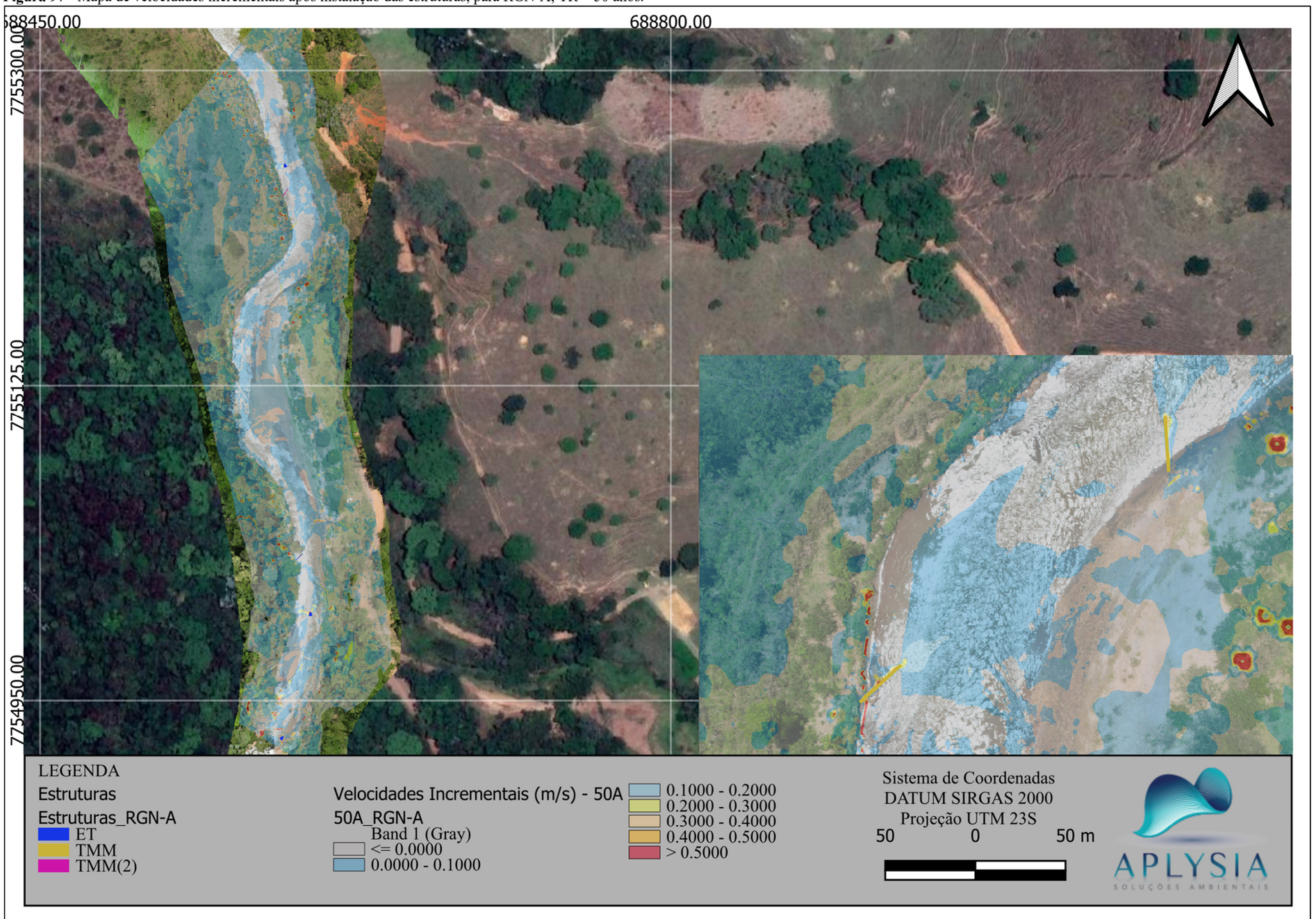
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 96 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-A; TR = 25 anos.



Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 97 - Mapa de velocidades incrementais após instalação das estruturas, para RGN-A; TR = 50 anos.



Fonte: Aplysia, 2024.