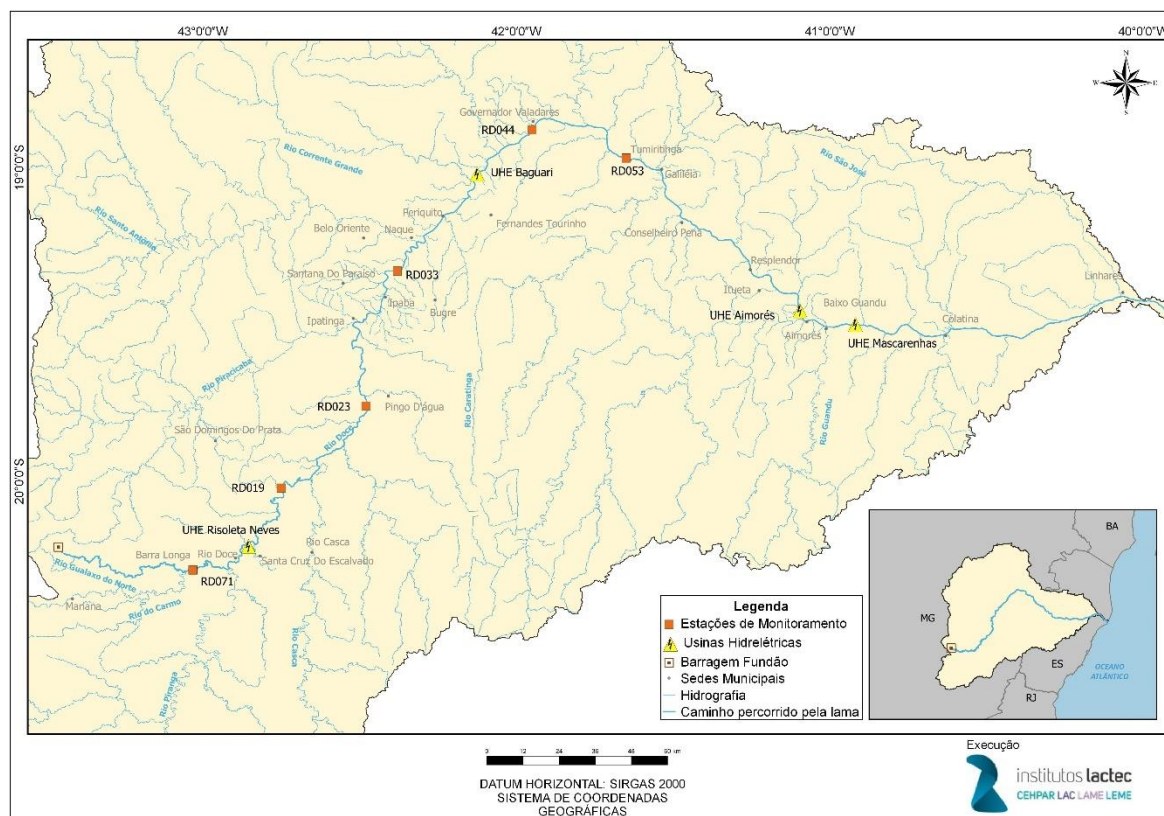


Figura 22 – Estações de monitoramento avaliadas na análise quali-quantitativa da água.

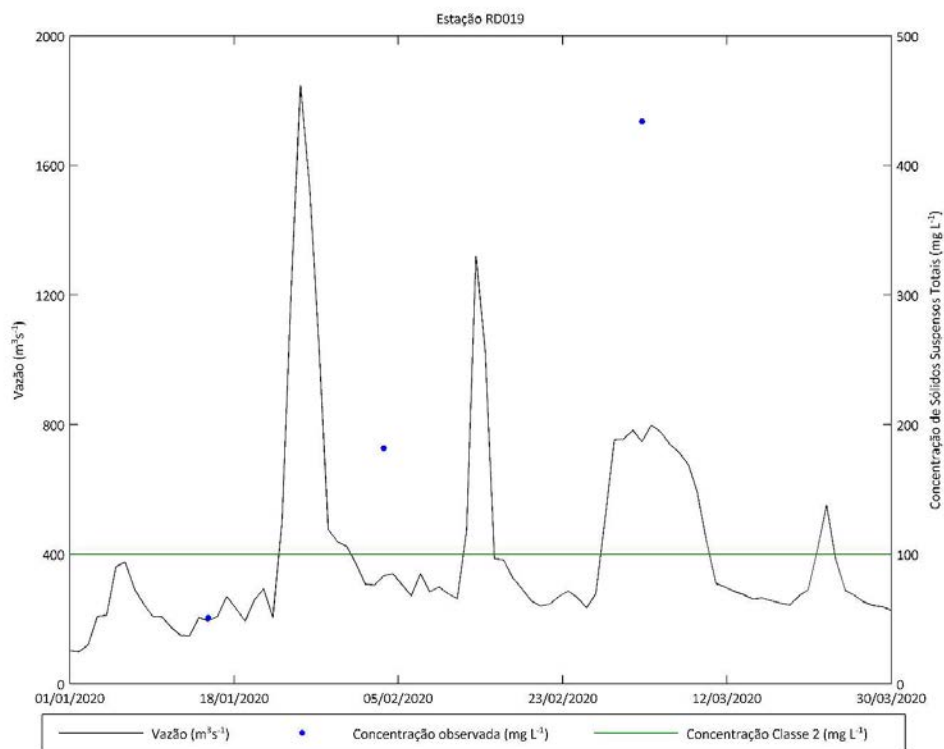


Fonte: Lactec (2020).

Na Figura 24 está apresentada uma comparação entre a carga máxima de linha-base de sólidos suspensos totais (SST) e as cargas estimadas para 2020. Nos períodos em que não é apresentado o valor de carga correspondente, não há observações de vazão na estação. Na estação RD053, única estação que teve o monitoramento da qualidade da água próximo ao pico da cheia de janeiro, resultou no referido mês carga 1,36 vezes superior à carga máxima de linha-base. Contudo, dados de vazão para os meses de fevereiro (a partir do dia 10) e março não se encontraram disponíveis.

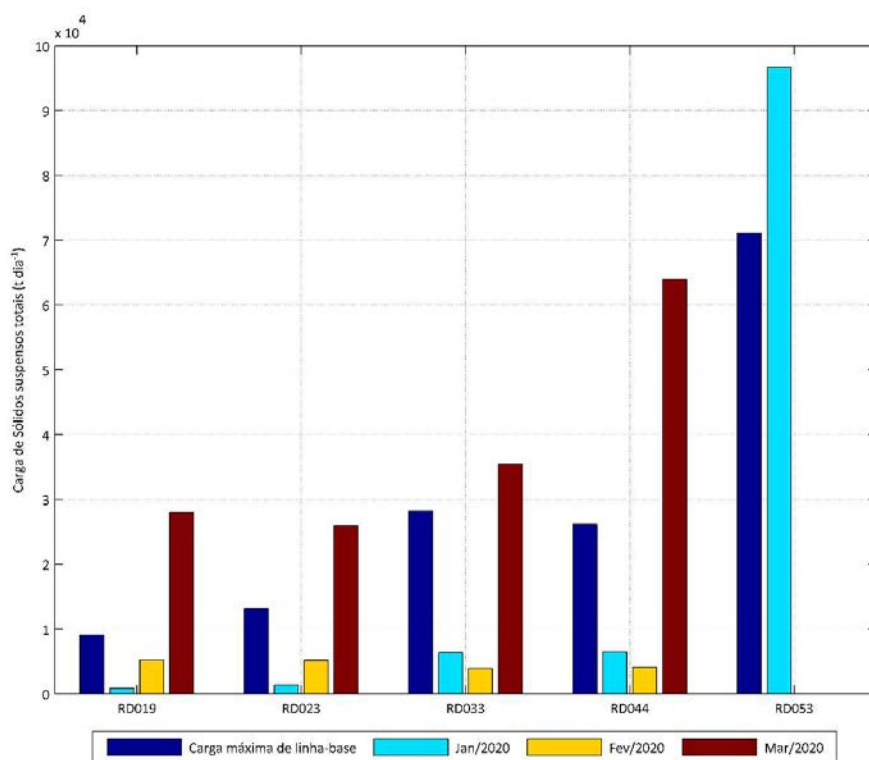
No mês de março/2020, as estações RD019, RD023, RD033 e RD044 que, em janeiro/2020, tiveram a qualidade da água monitorada antes do pico da cheia, chegaram a apresentar cargas ainda superiores às cargas máximas de linha-base. Para uma comparação, na Tabela 4 estão apresentados os valores de vazão e concentração para os resultados apresentados na Figura 24.

Figura 23 – Série histórica de vazões, concentração de sólidos suspensos totais na estação RD019 para o ano de 2020 e limite da concentração de sólidos suspensos para a classe 2.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 24 – Cargas de sólidos suspensos totais (máximo de linha-base e cargas de janeiro, fevereiro e março de 2020) nas estações RD019, RD023, RD033, RD044 e RD053.



Fonte: Lactec (2020).

Na estação RD019, a carga máxima de linha-base foi ultrapassada em 3,1 vezes no mês de março/2020, na qual foi verificada uma vazão de $747,49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e uma concentração de 434 mg L^{-1} , que ultrapassou o limite da classe 2 da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008, de 100 mg L^{-1} . A concentração de SST para a carga máxima de linha-base na estação RD019 também ultrapassou o limite legislado.

Tabela 4 – Cargas de sólidos suspensos totais (máximo de linha-base e cargas de janeiro, fevereiro e março de 2020), vazões e concentrações nas estações RD019, RD023, RD033, RD044 e RD053.

Estação	Linha-base			2020			
	Carga máxima* (t dia ⁻¹)	Vazão (m ³ s ⁻¹)	Concentração (mg L ⁻¹)	Mês	Carga (t dia ⁻¹)	Vazão (m ³ s ⁻¹)	Concentração (mg L ⁻¹)
RD019	9.079,20	571,90	184	Jan	854,08	193,83	51
				Fev	5.239,86	333,22	182
				Mar	28.029,15	747,49	434
RD023	13.185,89	748,11	204	Jan	1.357,15	227,65	69
				Fev	5.154,01	397,69	150
				Mar	26.005,13	826,88	364
RD033	28.209,11	481,55	678	Jan	6.380,43	559,45	132
				Fev	3.852,80	469,40	95
				Mar	35.440,98	1.353,78	303
RD044	26.146,64	1.644,69	184	Jan	6.512,97	810,56	93
				Fev	4.078,08	674,29	70
				Mar	63.996,77	2.336,60	317
RD053	71.139,01	2.386,57	345	Jan	96.746,32	4.998,88	224
				Fev	-	-	60
				Mar	-	-	145

*Carga máxima registrada no período pré-rompimento, resultante do produto entre a vazão do corpo hídrico e a concentração do parâmetro de qualidade de água.

Na estação RD023, a carga máxima de linha-base também foi ultrapassada no mês de março/2020 (em 1,97 vezes), em que a vazão no dia do monitoramento de qualidade da água foi de $826,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e concentração de 364 mg L^{-1} . Na estação RD033, a carga máxima de linha-base foi ultrapassada em 1,26 vezes no mês de março/2020, devido a uma vazão de $1.353,78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e concentração de 303 mg L^{-1} , que ultrapassou o limite legislado para classe 2. Na estação RD044, a carga máxima de linha-base foi ultrapassada em 2,45 vezes em março/2020, devido a uma vazão de $2.336,60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e uma concentração de 317 mg L^{-1} , que ultrapassou o limite legislado para classe 2. Na estação RD053 não foram registrados dados de vazão no dia do monitoramento de qualidade da água em fevereiro e março/2020 e, em janeiro/2020, a carga máxima de linha-base foi ultrapassada em 1,36 vezes, devido a uma vazão de $4.998,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e uma concentração de sólidos suspensos totais de 224 mg L^{-1} , que ultrapassou o limite legislado para a classe 2, observados durante o período da cheia.

Estes resultados mostram que as cargas máximas de linha-base voltaram a ser ultrapassadas no período chuvoso de 2020. Como comparação, a avaliação quali-quantitativa para o ano de 2019 para sólidos suspensos totais não apresentou cargas que ultrapassaram o histórico nas estações

apresentadas. Estes resultados podem ser consultados no Relatório Suplementar de Cargas, apresentado no TOMO II do presente relatório. É importante destacar que, para o pico da cheia de 2020 não estavam disponíveis dados de qualidade da água (com exceção da estação RD053, no qual a carga máxima de linha-base foi ultrapassada), no entanto, o monitoramento realizado em março/2020 também reforça o aumento de cargas no período chuvoso, o qual indica que há uma ressuspensão do material depositado nos reservatórios e ao longo do rio Doce, assim como o aporte de material depositado nas margens. Estes resultados também demonstram a necessidade de um monitoramento mais frequente de qualidade da água nestes períodos, tendo em vista os resultados apresentados para o período da cheia de 2020, assim como na avaliação dos demais períodos chuvosos do pós-desastre.

5.2 MODELAGEM DA CHEIA, COTAS DE INUNDAÇÃO E TEMPOS DE RETORNO

Durante o período das cheias, que compreende de outubro a março, o rejeito depositado ao longo do rio é ressuspensão pela força das águas. A cheia de janeiro de 2020 foi a maior cheia ocorrida após a ruptura da barragem de Fundão. O rejeito ressuspensão por esta cheia foi levado para outros pontos do leito e das margens do rio Doce, onde foi depositado após a passagem da onda. Portanto considera-se que toda a área atingida por esta cheia é passível desta nova deposição, sendo então nomeada como Área de Susceptibilidade ao Extravasamento de Rejeito (ASER) por estar susceptível a novas deposições em futuras novas cheias desta mesma magnitude, enquanto houver rejeito no leito do rio Doce.

Devido a imprevisibilidade das futuras cheias, foi calculado também as áreas alagadas devido a vários tempos de recorrência (TRs), que também podem ser afetadas pela ressuspensão do rejeito, porém com diferentes probabilidades em função do tempo de recorrência da cheia e da distância temporal entre o desastre e da futura ocorrência, visto que, ao passar dos anos, há a diminuição da quantidade de rejeitos ainda alocado no leito.

Neste subitem (5.2) serão apresentadas as áreas ASER e TRs (5, 10, 25, 50 e 100 anos) obtidas para a jusante do reservatório de Candonga até a foz do rio Doce.

5.2.1 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A MODELAGEM DA CHEIA, COTAS DE INUNDAÇÃO E TEMPOS DE RETORNO

A ASER foi calculada utilizando a modelagem hidrodinâmica da cheia ocorrida em janeiro de 2020 através do modelo HEC-RAS na área à jusante do reservatório da UHE Candonga até a foz do rio Doce.

Na região a montante da UHE Candonga, a magnitude da cheia ocorrida durante a passagem da onda de ruptura, em novembro de 2015, foi tão intensa que se estima que não ocorram, no futuro, cheias superiores aquela, sendo, portanto, desnecessário o cálculo da ASER nesta região.

Para o cálculo das áreas alagadas, para vários tempos de recorrência, foram realizados estudos de análise de frequência de cheias em vários pontos do rio Doce e também foi utilizada a modelagem hidrodinâmica por meio do software HEC-RAS (do inglês, “Hydrologic Engineering Center” – “River Analysis System”).

O HEC-RAS, desenvolvido no “Hydrologic Engineering Center”, entidade do “Corps of Engineers” dos Estados Unidos, é um modelo hidrodinâmico com o objetivo de representar o fluxo das águas. O programa permite o cálculo do perfil da superfície livre da água para diversos tipos de escoamentos. As equações matemáticas consideradas são basicamente a da Continuidade (conservação de massa) e a do Momento (conservação da quantidade de movimento), solucionadas por meio do esquema implícito de diferenças finitas.

Neste estudo, foi utilizada a modelagem unidimensional (1D) da UHE Candonga até o município de Colatina. De Colatina até a foz do rio Doce, foi adotada a modelagem bidimensional (2D) mais adequada para regiões mais planas. Os detalhes da metodologia, dados utilizados e resultados completos estão apresentados no APÊNDICE A.

5.2.1.1 *Dados de Entrada do Modelo*

Foi utilizado, para esta modelagem, um levantamento topográfico de alta definição obtido por laser aerotransportado (LIDAR, considerado a melhor tecnologia existente atualmente) de praticamente toda a área, disponibilizado pela Fundação Renova (2019), aliado a um levantamento batimétrico do rio Doce através de 160 seções batimétricas obtidas pela ANA (Agência Nacional de Águas), originando uma distância média de 6 km entre as seções. Nas áreas mais afastadas do rio Doce na região litorânea do Espírito Santo foram utilizados os dados topográficos obtidos de um levantamento realizado por “Hiparc Geotecnologia”, entre os anos de 2012 a 2015, para o IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo) e complementado pelo BHO ANA 5K (Base Hidrográfica ottocodificada - Agência Nacional de Águas) para obtenção da rede de drenagem. Foram utilizados, também, dados de vazões e precipitações ocorridas em janeiro de 2020 e dados de marés e de nível d’água observados em vários pontos ao longo do rio Doce (através de réguas linimétricas ou marcas de enchente), para verificação e validação do modelo.

Quanto ao estudo de análise de frequência de cheias, foram utilizados dados das estações fluviométricas de Rio Dantas, Cachoeira dos Óculos, Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina.

5.2.1.2 *Calibração e Validação*

A calibração do modelo hidrodinâmico e sua validação correspondem a verificar e adaptar os coeficientes do modelo para que este represente adequadamente a realidade. Para isso são confrontados dados simulados e observados em alguns pontos do domínio modelado.

A calibração do modelo foi a mesma realizada para a obtenção da APDL (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m), quando se utilizou a cheia de 2013 por ser o maior evento do histórico, na qual apresentou um erro médio quadrático das anomalias dos níveis em 0,32 m, valor considerado adequado para este tipo de modelagem em uma área da magnitude modelada. Neste atual estudo foi realizado a validação e verificação para a cheia de 2020.

Foram utilizados pontos de marcas de enchente e de réguas linimétricas instaladas em estações fluviométricas ao longo do rio e na foz (réguas de maré) para verificação das cotas máximas da cheia de janeiro de 2020 e aqueles simulados com os modelos hidrodinâmicos e o RMSE (raiz do erro quadrático médio) dos níveis d'água foi de 0,64 m, havendo tendência de subestimativas dos valores simulados em relação aos observados, atestando a boa qualidade do modelo para representação desta cheia. A área alagada é levemente conservadora visto a tendência de subestimativa desta área.

A diferença entre o observado e o simulado durante o pico da inundação foi de -0,06 m e 0,27 m em Governador Valadares e Colatina, respectivamente, representando de maneira adequada este evento nestes dois locais urbanos.

5.2.1.3 *Uso do Solo e Áreas Afetadas*

A partir da obtenção das áreas da ASER, e das cheias relativas às TRs, foram estimados os tipos de uso de solo atingidos por estas áreas.

Para isso foi necessário realizar um mapeamento do uso do solo, na escala 1:20.000, o qual foi elaborado pelo Lactec, e refere-se aos períodos pré e pós-desastre, compreendendo o trecho das cabeceiras do rio Doce e entorno, desde a barragem de Fundão, no município de Mariana em Minas Gerais, até a foz do rio Doce, em Regência no Estado do Espírito Santo. No caso da ASER e cheias das TRs utilizou-se este mapeamento a jusante da UHE Candonga.

Para obtenção do uso do solo para as áreas atingidas em cheias de TRs (5, 10, 25, 50 e 100 anos) e na ASER (cheia 2020) foi utilizado as ortoimagens orbitais do período pré-desastre (T0) fornecidas pela Fundação Renova e também as imagens orbitais disponíveis nos softwares ArcGis e QGis.

5.2.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA A MODELAGEM DA CHEIA, COTAS DE INUNDAÇÃO E TEMPOS DE RETORNO

As áreas alagadas estimadas pela modelagem hidrodinâmica, simulando a cheia de janeiro de 2020, foram definidas como a ASER (Figura 25). Foram afetados a jusante da UHE Candonga um total de 1549,48 km² que corresponde a área ribeirinha (incluindo a calha natural do rio). Comparando com a APDL (899,30 km²) a ASER atingiu uma área maior, isto porque a ruptura de Fundação ocorreu em um ano onde a cheia natural do rio foi menor. A Tabela 5 apresenta a área em km² da ASER por município. A Tabela 6 apresenta as áreas atingidas pelas cheias de vários tempos de recorrência. Comparando-se os valores das duas tabelas nota-se que o tempo de recorrências da ASER varia para cada ponto do rio e na maioria dos municípios gira em torno de 25 anos.

Na região litorânea houve uma diminuição significativa da área da ASER em relação as áreas afetadas pelas cheias das TRs. Isto porque na ASER não foram computadas as áreas das lagoas Nova e Juparanã, pois na cheia de 2020 estas estavam protegidas pelos diques. Outro motivo é que nesta região o tempo de retorno de ASER foi realmente bem menor que nas demais regiões.

A inundação da cheia de 2020 nos afluentes do Doce foi analisada do ponto de vista da mistura das águas de tal modo que em certos afluentes a ASER for cortada antes do término da influência do remanso devido a cheia, por considermos que em certas condições a lama de rejeito proveniente do rio Doce não adentra os afluentes devido a força da vazão destes afluentes. Fato bem conhecido desta não mistura das águas acontece nos rios Negro e Solimões (no Amazonas). Isso afeta as áreas impactadas pela ASER e pelas cheias das TRs, o que dificulta a simples comparação entre as áreas.

Os municípios com a maior área atingida pela ASER são Linhares com 1040,31 km² e Aracruz com 97,51 km². Comparando as áreas atingidas pela ASER e pela APDL (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m) os maiores incrementos de área foram os munic piois de Linhares, Aracruz, Jaguar  e São Mateus com incrementos de área de 475,20 km²; 34,91 km²; 24,36 km² e 68,88 km² respectivamente. Estes municípios possuem extensas áreas planas próximas à foz do Rio Doce. Neste trecho próximo a foz do Rio Doce, em período de seca, o rio corre dentro de sua calha. Durante as grandes cheias, que geralmente ocorrem de dezembro a março, nos momentos de pico da vazão o rio extravasa a calha e alaga tais áreas de planície, as quais geralmente correspondem a outras bacias hidrográficas vizinhas. A Figura 26 mostra a ASER neste trecho de Linhares. A Figura 27 é uma foto do satélite em 26/12/2013 indicando este fen meno de alagamento desta área durante a cheia de dezembro de 2013, outra cheia de grande magnitude que foi utilizada para a calibra em do modelo. Infelizmente a única foto satélite na data da cheia de janeiro de 2020   de 31/01/2020 (5 dias após o pico da cheia) e apresenta um excesso de nuvem o que dificulta visualização (APÊNDICE B). Mais alguns exemplos da ASER são apresentados na Figura 28 e Figura 29 onde mostram as regiões da entrada da Lagoa Nova e da Lagoa

Juparanã, respectivamente. Cabe ressaltar que no cálculo das áreas alagadas na ASER foi considerado a existência dos diques protetores às Lagoas Nova e Juparanã. A Figura 30 apresenta a simulação da cheia de 2020 caso não existisse os diques.

Cidades com área urbana ribeirinha com Governador Valadares, Colatina, Aimores, Baixo Guandu, tiveram 47,09 km², 35,90 km², 21,09 km² e 6,83 km² respectivamente de área afetada. Entre a Figura 31 e a Figura 33 são apresentados a ASER nestas cidades.

Tabela 5 – Quantificação da área afetada pela ASER por município a jusante da UHE Candonga.

Município	Área Afetada, ASER. (Km ²)
AIMORÉS	21,09
ALPERCATA	10,31
ARACRUZ	97,51
BAIXO GUANDU	6,83
BELO ORIENTE	4,01
BOM JESUS DO GALHO	4,16
BUGRE	3,58
CARATINGA	5,41
COLATINA	35,90
CONSELHEIRO PENA	18,76
CÓRREGO NOVO	4,47
DIONÍSIO	4,42
FERNANDES TOURINHO	7,09
GALILÉIA	10,87
GOVERNADOR VALADARES	47,09
IAPU	9,61
IPABA	4,83
IPATINGA	0,33
ITUETA	13,75
JAGUARÉ	25,10
LINHARES	1040,31
MARILÂNDIA	9,43
MARLIÉRIA	6,27
NAQUE	4,38
PERIQUITO	10,65
PINGO-D'ÁGUA	0,77
RAUL SOARES	1,17
RESPLENDOR	12,75
RIO CASCA	7,08
RIO DOCE	1,07
SANTA CRUZ DO ESCALVADO	2,91
SANTANA DO PARAÍSO	6,04
SÃO DOMINGOS DO PRATA	0,58
SÃO JOSÉ DO GOIABAL	4,62
SÃO MATEUS	71,36

Município	Área Afetada, ASER. (Km ²)
SÃO PEDRO DOS FERROS	4,79
SEM-PEIXE	6,35
SOBRÁLIA	3,85
TIMÓTEO	1,76
TUMIRITINGA	18,22
TOTAL	1549,48

Tabela 6 – Quantificação da área afetada (km²) por cheias de vários tempos de recorrência a jusante da UHE Candonga.

Município	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
AÇUCENA	0,17	0,32	0,48	0,71	0,73
AIMORÉS	19,82	21,10	22,10	23,31	24,22
ALPERCATA	6,82	8,07	9,16	10,18	10,43
ARACRUZ	127,74	128,02	143,26	143,47	143,79
BAIXO GUANDU	7,03	7,53	8,01	8,86	9,47
BELO ORIENTE	4,01	4,88	5,24	5,78	5,97
BOM JESUS DO GALHO	2,61	3,18	3,71	4,30	4,52
BUGRE	2,84	3,15	3,40	3,66	3,76
CARATINGA	3,54	4,47	5,14	5,69	5,85
COLATINA	30,82	34,45	37,03	39,89	41,04
CONSELHEIRO PENA	14,60	17,06	18,14	19,36	20,37
CÓRREGO NOVO	3,10	3,65	4,02	4,37	4,53
DIONÍSIO	3,16	3,66	3,87	4,17	4,32
FERNANDES TOURINHO	6,23	6,43	6,63	6,98	7,09
GALILÉIA	7,82	9,27	10,34	11,55	12,12
GOVERNADOR VALADARES	26,17	33,82	40,91	46,84	48,23
IAPU	7,73	8,40	9,00	9,75	9,96
IPABA	3,55	4,25	4,78	5,16	5,28
IPATINGA	0,32	0,37	0,45	0,52	0,58
ITUETA	14,34	14,51	14,67	14,67	14,91
JAGUARÉ	90,74	92,20	92,21	92,21	92,21
LINHARES	1392,85	1475,97	1550,01	1587,72	1621,04
MARILÂNDIA	8,11	9,42	9,76	9,94	10,02
MARLIÉRIA	5,00	5,53	5,95	6,55	6,81
NAQUE	3,75	4,14	4,62	5,03	5,25
PERIQUITO	9,69	10,34	10,62	11,36	11,71
PINGO-D'ÁGUA	0,57	0,64	0,68	0,77	0,81
RAUL SOARES	0,82	0,96	1,05	1,13	1,15
RESPLENDOR	12,70	13,36	13,71	13,75	14,39
RIO BANANAL	11,64	13,75	14,18	14,49	14,76
RIO CASCA	3,85	5,11	6,11	7,17	7,47
RIO DOCE	0,86	0,89	0,94	1,08	1,16
SANTA CRUZ DO ESCALVADO	1,16	1,61	2,06	2,89	3,14

Município	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
SANTANA DO PARAÍSO	5,00	5,63	5,98	6,35	6,55
SÃO DOMINGOS DO PRATA	0,31	0,45	0,57	0,66	0,69
SÃO JOSÉ DO GOIABAL	2,69	3,45	3,99	4,54	4,71
SÃO MATEUS	217,12	228,47	234,83	236,22	237,10
SÃO PEDRO DOS FERROS	3,37	3,92	4,24	4,66	4,84
SEM-PEIXE	2,41	4,01	5,08	6,39	6,75
SOBRÁLIA	3,57	3,67	3,74	3,84	3,88
SOORETAMA	3,89	5,11	5,33	5,44	5,51
TIMÓTEO	1,40	1,64	1,83	2,06	2,15
TUMIRITINGA	11,90	15,02	17,28	19,40	20,52
TOTAL	2085,85	2221,88	2345,13	2412,85	2459,81

O resultado das áreas alagadas para vários tempos de recorrência é apresentado entre a Figura 34 e a Figura 40. Pode-se notar pelas figuras que, para um tempo de recorrência igual a 5 anos, grande parte área é atingida. Devido à configuração topográfica da região, as cheias para valores mais elevados de tempo de recorrência possuem acréscimos de área alagada pequenos.

Entre a Figura 41 e a Figura 43 é apresentada uma comparação entre as áreas alagadas pela ASER e pelas TRs em Colatina Baixo Gandu e Colatina. Pode-se observar que o tempo de recorrência da ASER é diferente para cada local, como já mencionado anteriormente.

Verifica-se também o atingimento de várias lagoas próximas a Linhares, com tempo de recorrência diferentes, sendo que no tempo de recorrência de 5 anos as Lagoas Nova e Juparanã já são atingidas. Outras são atingidas em 10 anos de recorrência, por exemplo a Lagoa de Palmas, e outras em 25 anos de recorrência. Estes resultados reforçam o fato que enquanto tiver rejeito no leito do rio Doce sendo ressuspensionado durante as cheias é necessário proteger estas lagoas durante a passagem das cheias, principalmente a Lagoa Nova e Juparanã que são as mais suscetíveis a alagamento pelas águas do rio Doce.

O uso do solo das áreas afetadas foi calculado para a área da ASER, a jusante da UHE Risoleta Neves até a foz do rio Doce (Tabela 7). Os usos mais afetados pela cheia de 2020 foram as áreas de várzeas (40%), corpos hídricos (17%), mata nativa (14%), pastagem (14%) e agricultura (7%). Na Tabela 8, é apresentado o uso do solo nas áreas alagadas pelas hipotéticas cheias de vários tempos de recorrência.

Tabela 7 – Uso do solo para ASER 2020 – trecho a jusante da UHE Risoleta Neves até a foz do rio Doce.

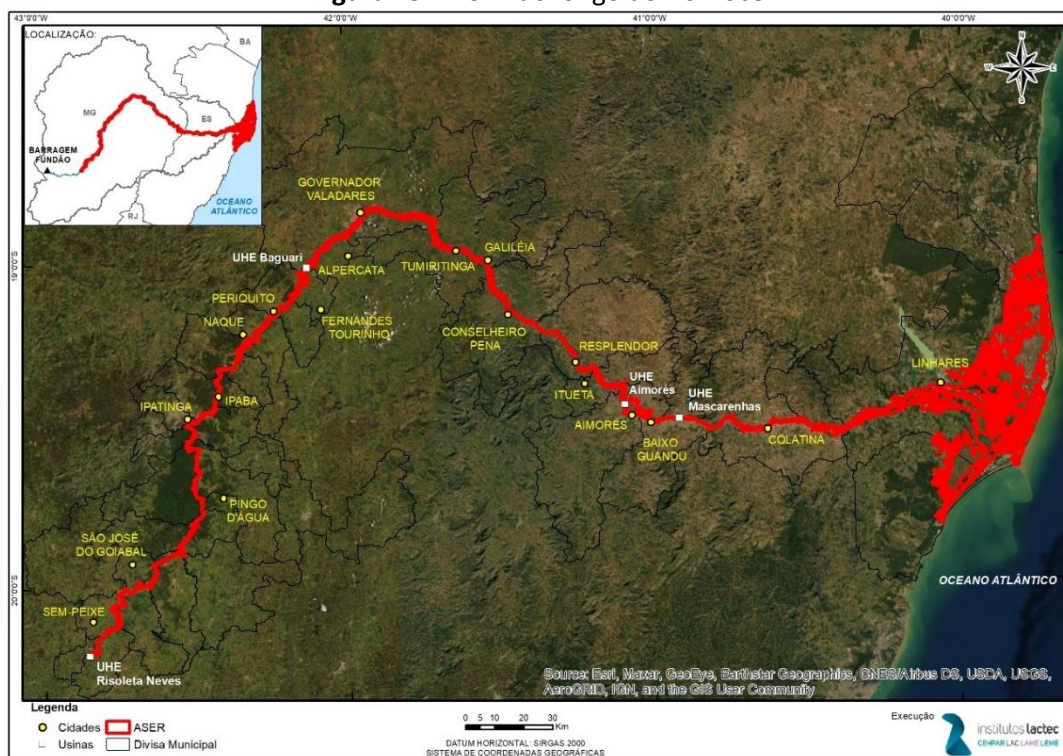
Município	Área Afetada, ASER. (HA)	Área Afetada, ASER. (Km ²)
Afloramento Rochoso	425,98	4,260
Agricultura	11363,98	113,640

Area Construida	353,72	3,537
Area Urbanizada	686,26	6,863
Banco de Areia	2426,22	24,262
Campo Rupestre	3,42	0,034
Corpos d'água	25578,00	255,780
Ilha	4237,98	42,380
Mata Nativa	22426,46	224,265
Mineração	0,89	0,009
Pastagem	21365,22	213,652
Praia	47,73	0,477
Restinga	36,30	0,363
Silvicultura	1679,51	16,795
Solo Exposto	540,54	5,405
Varzea	61283,46	612,835
Vegetação secundaria inicial	2492,051	24,921
TOTAL	154947,710	1549,477

Tabela 8 - Uso do solo para cheias de vários TRs – trecho a jusante da UHE Risoleta Neves até a foz do rio Doce.

CLASSE	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
Afloramento Rochoso	3,59	3,89	3,98	4,06	4,18
Agricultura	103,21	116,86	128,43	136,77	141,54
Area Construida	5,02	5,73	6,48	6,74	6,96
Area Urbanizada	3,54	4,42	7,10	10,84	12,49
Banco de Areia	24,02	24,48	24,56	24,68	24,73
Campo Rupestre	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Corpos d'água	356,75	377,12	383,74	389,73	390,71
Ilha	32,19	37,95	41,37	43,85	44,67
Mata Nativa	245,38	276,23	311,20	328,06	339,85
Mineração	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Pastagem	318,21	345,16	370,67	386,55	399,81
Praia	0,43	0,53	0,59	0,61	0,68
Restinga	2,98	3,01	3,13	3,40	3,53
Silvicultura	31,15	34,52	41,73	44,40	46,27
Solo Exposto	4,79	5,48	6,09	6,78	6,99
Varzea	908,25	934,51	958,38	965,81	974,77
Vegetação secundaria inicial	46,30	51,95	57,62	60,50	62,56
TOTAL	2085,85	2221,88	2345,13	2412,85	2459,81

Figura 25 – ASER ao longo do rio Doce.



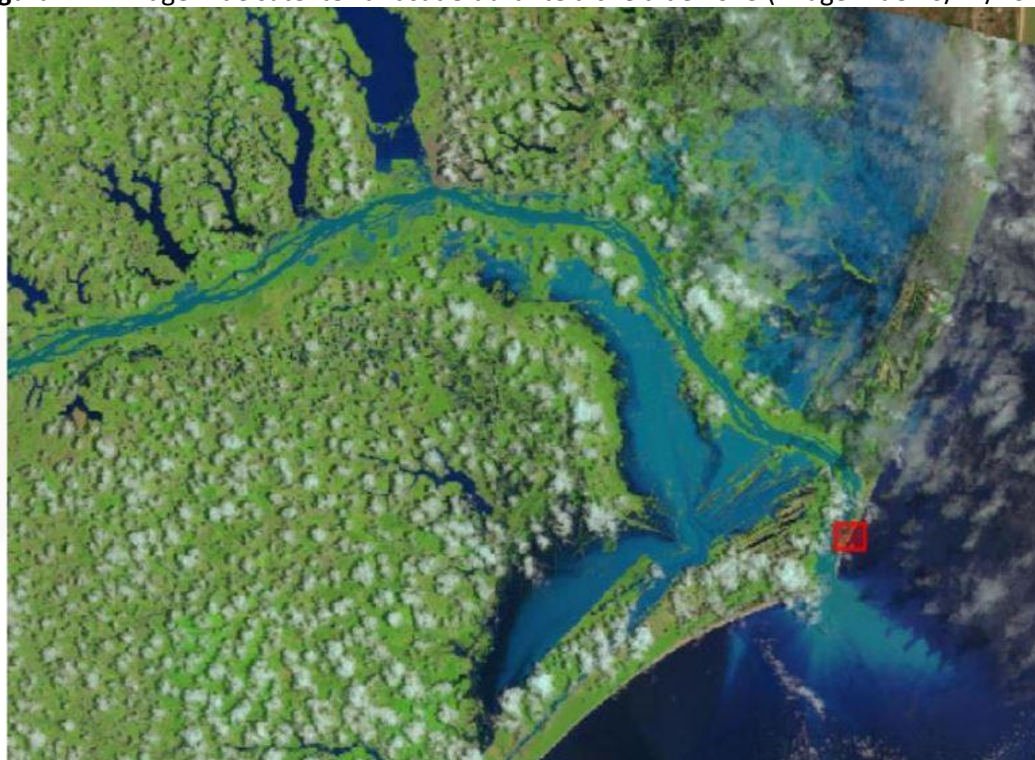
Fonte: Lactec (2020).

Figura 26 – ASER no município de Linhares. Simulação da cheia de janeiro de 2020.



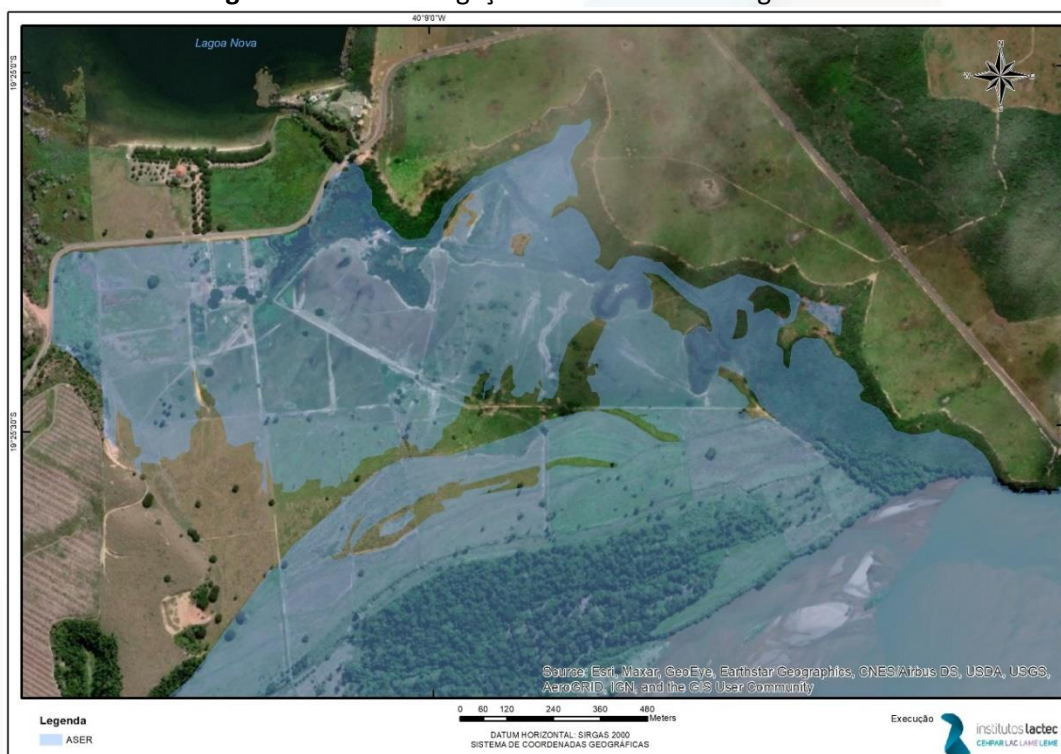
Fonte: Lactec (2020).

Figura 27 – Imagem de satélite Landsat 8 durante a cheia de 2013 (imagem de 26/12/2013).



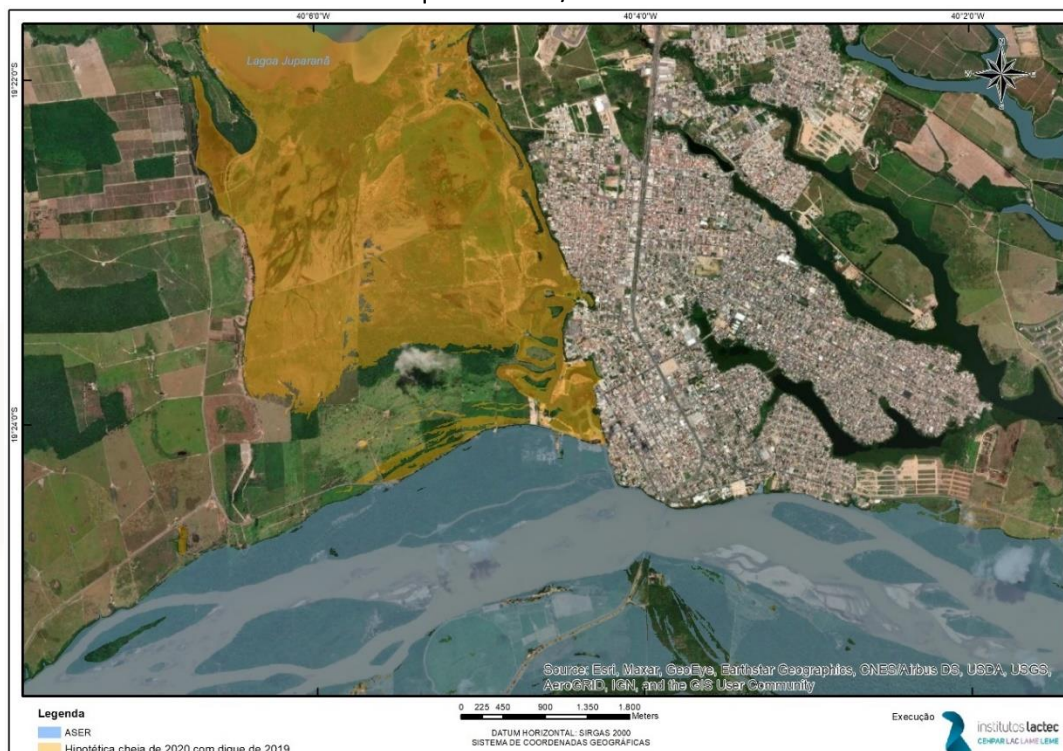
Fonte: Landsat 8 (2020).

Figura 28 - ASER na ligação entre rio Doce e Lagoa Nova.



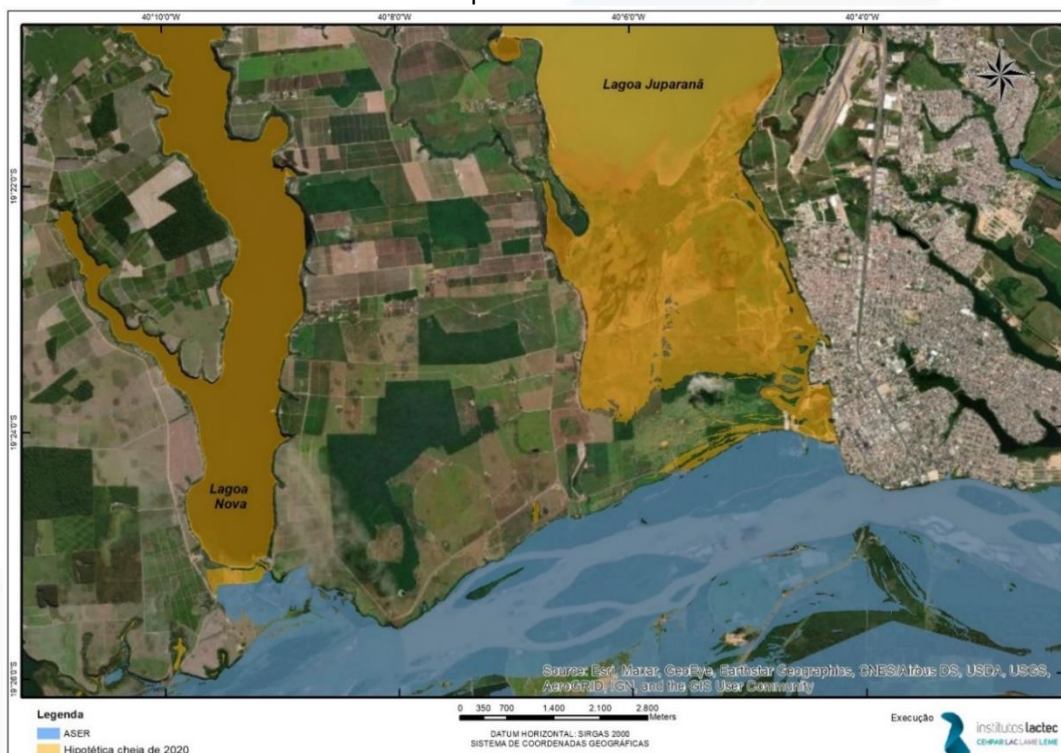
Fonte: Lactec (2020).

Figura 29 – Ligação do rio Doce com a Lagoa Juparanã. ASER e areia hipotética da cheia de 2020 com dique de 2018/2019.



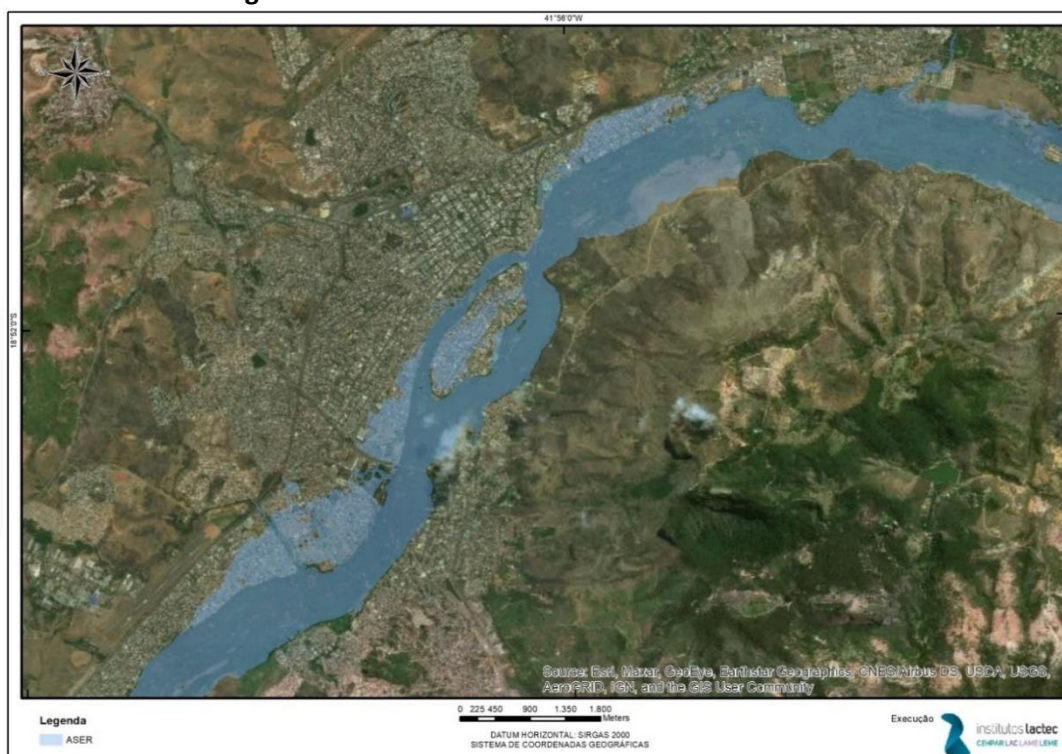
Fonte: Lactec (2020).

Figura 30 - ASER e cheia hipotética de 2020 caso não existisse os diques de proteção das lagoas Nova e Juparanã.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 31 - ASER na cidade de Governador Valadares.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 32 – ASER nas cidades e Aimores e Baixo Gandu.



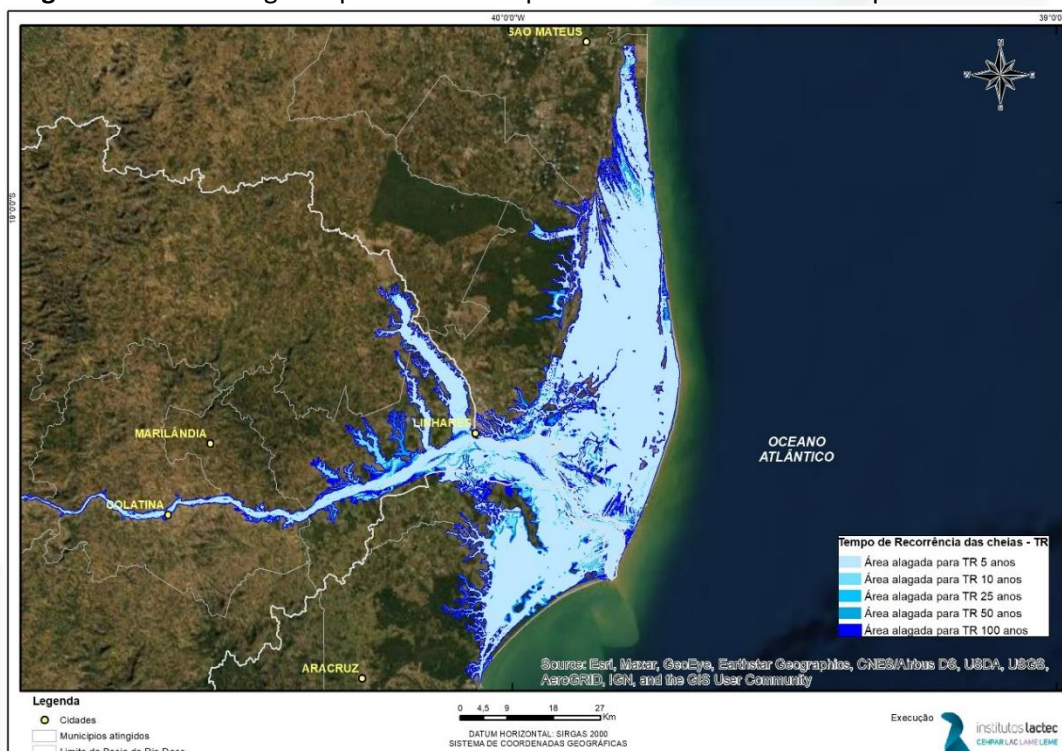
Fonte: Lactec (2020).

Figura 33 - ASER na cidade de Colatina.



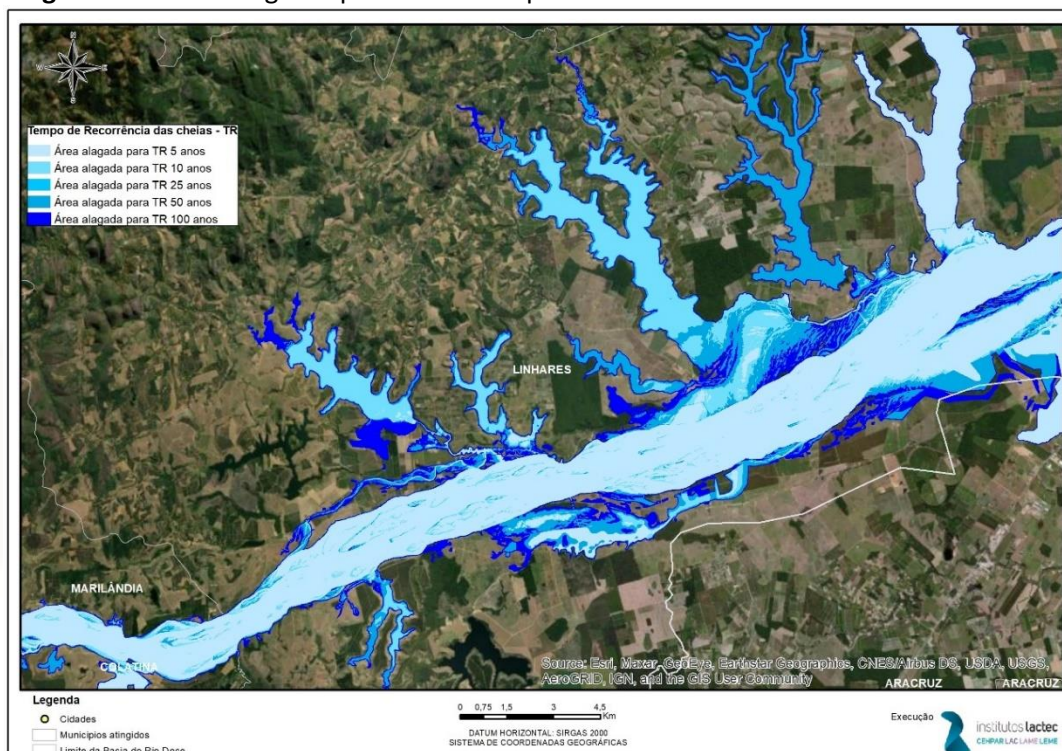
Fonte: Lactec (2020).

Figura 34 - Áreas alagadas para vários tempos de recorrência no município de Linhares.



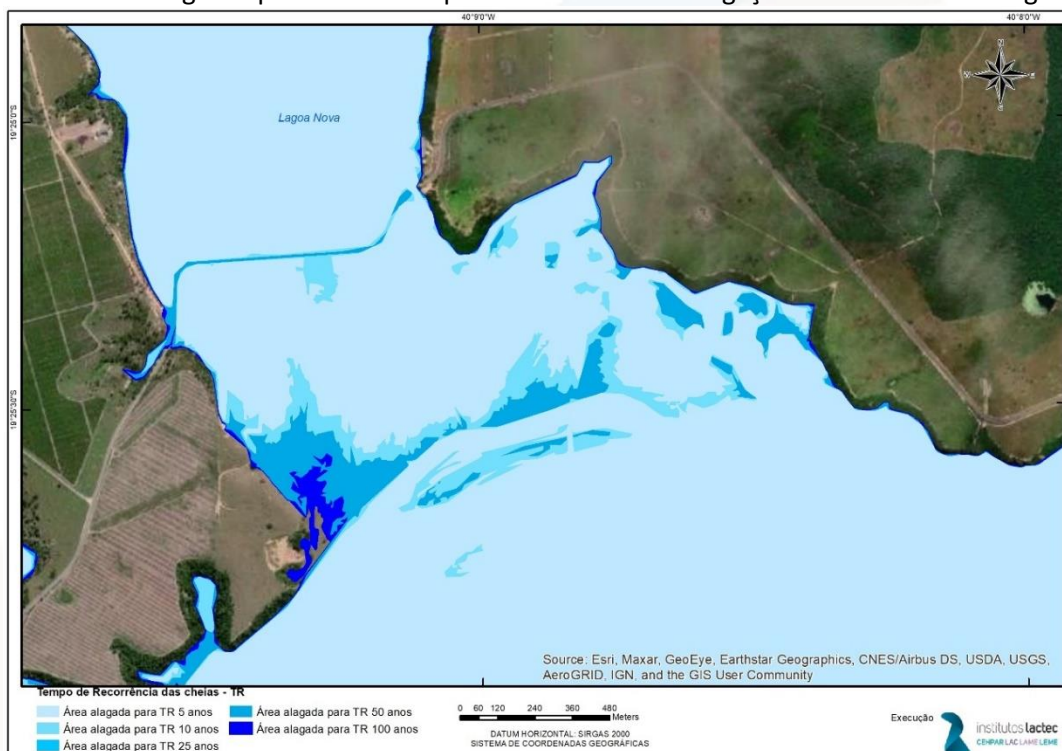
Fonte: Lactec (2020).

Figura 35 - Áreas alagadas para vários tempos de recorrência entre Colatina e Linhares.



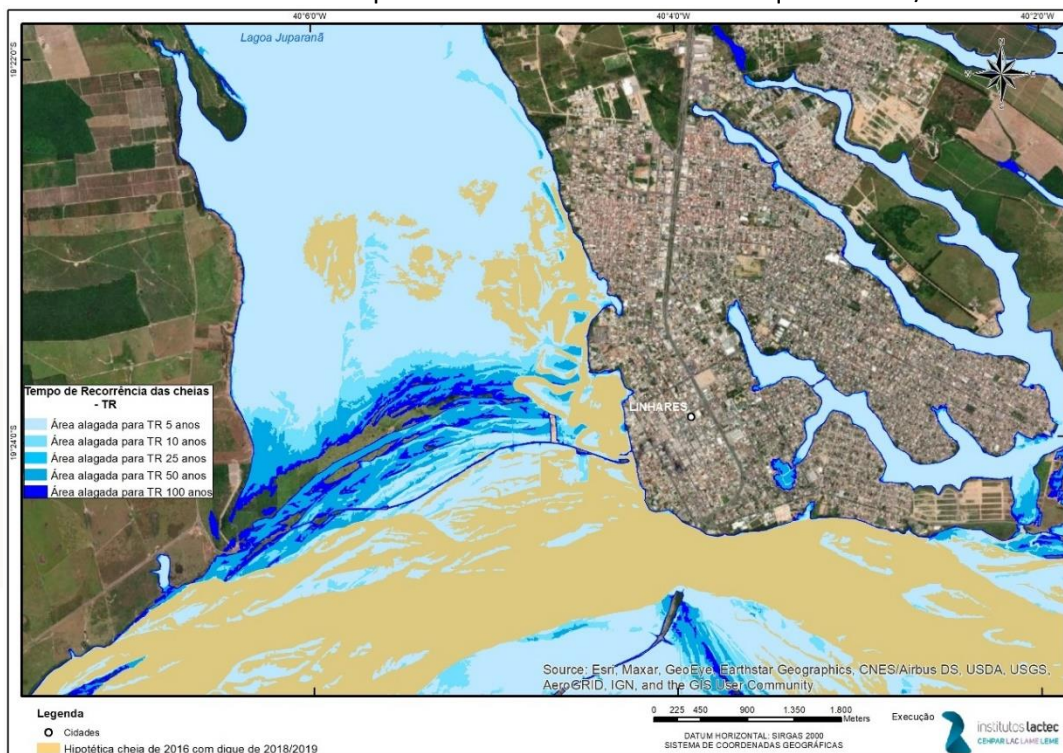
Fonte: Lactec (2020).

Figura 36 - Áreas alagadas para vários tempos de recorrência na ligação entre rio Doce e Lagoa Nova.



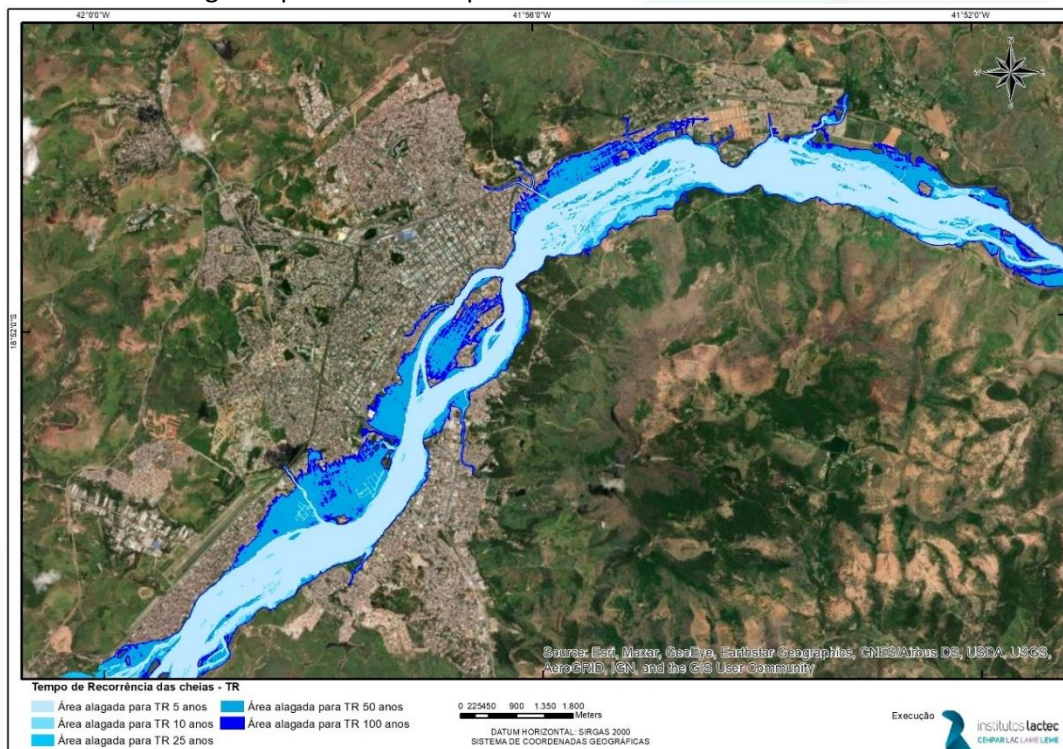
Fonte: Lactec (2020).

Figura 37 – Áreas alagadas em Linhares (entrada da Lagoa Juparanã) para vários tempos de recorrência e área da hipotética da cheia de 2016 com dique de 2018/2019.



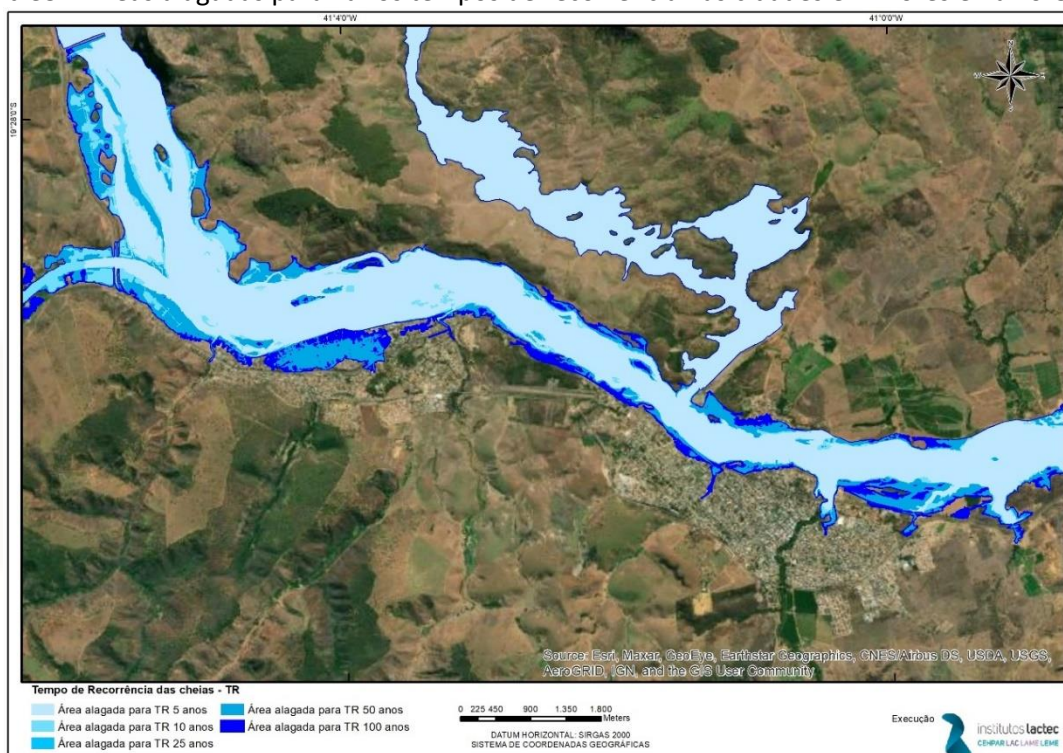
Fonte: Lactec (2020).

Figura 38 – Áreas alagadas para vários tempos de recorrência na cidade de Governador Valadares.



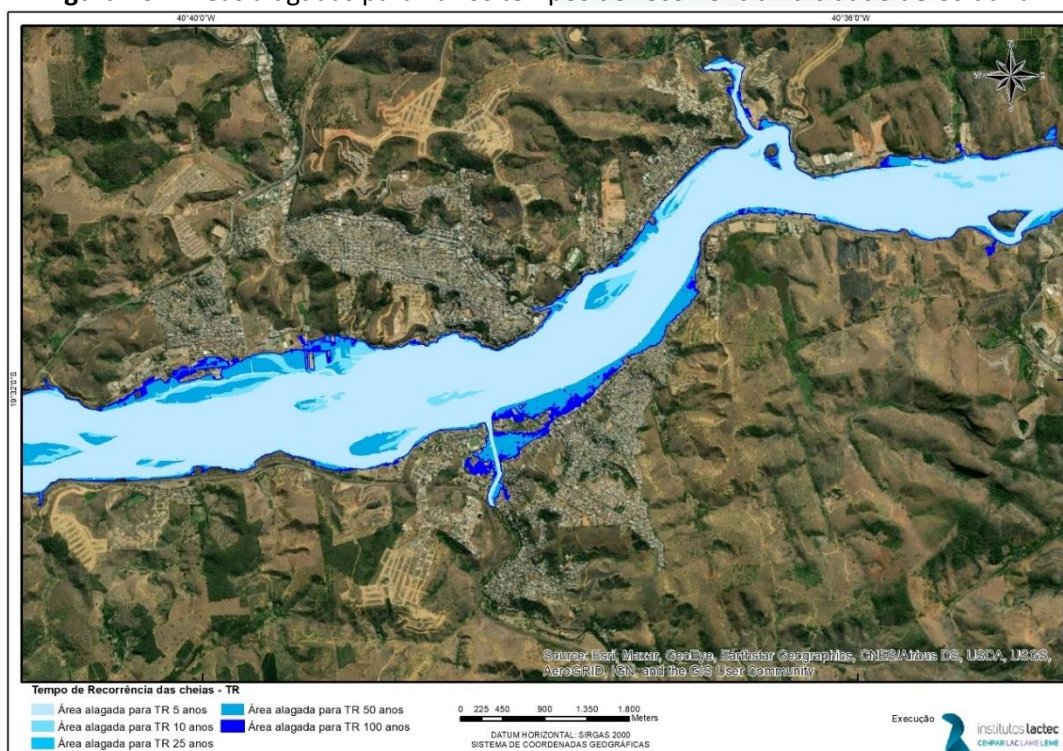
Fonte: Lactec (2020).

Figura 39 – Áreas alagadas para vários tempos de recorrência nas cidades e Aimores e Baixo Gandu.



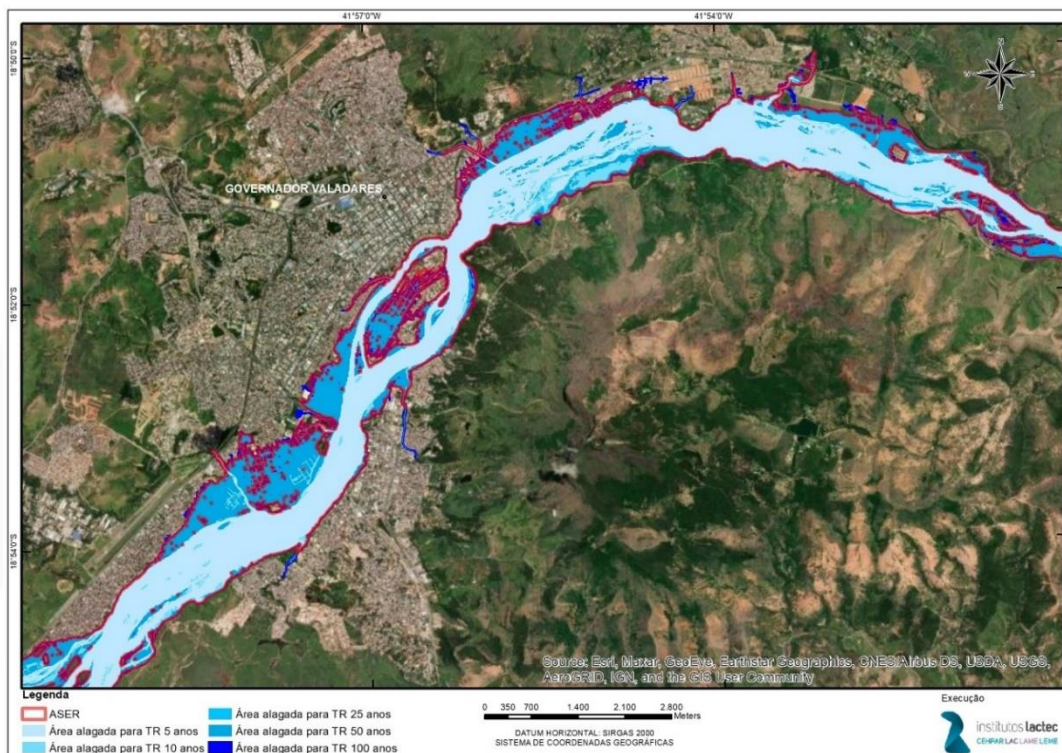
Fonte: Lactec (2020).

Figura 40 - Áreas alagadas para vários tempos de recorrência na cidade de Colatina.



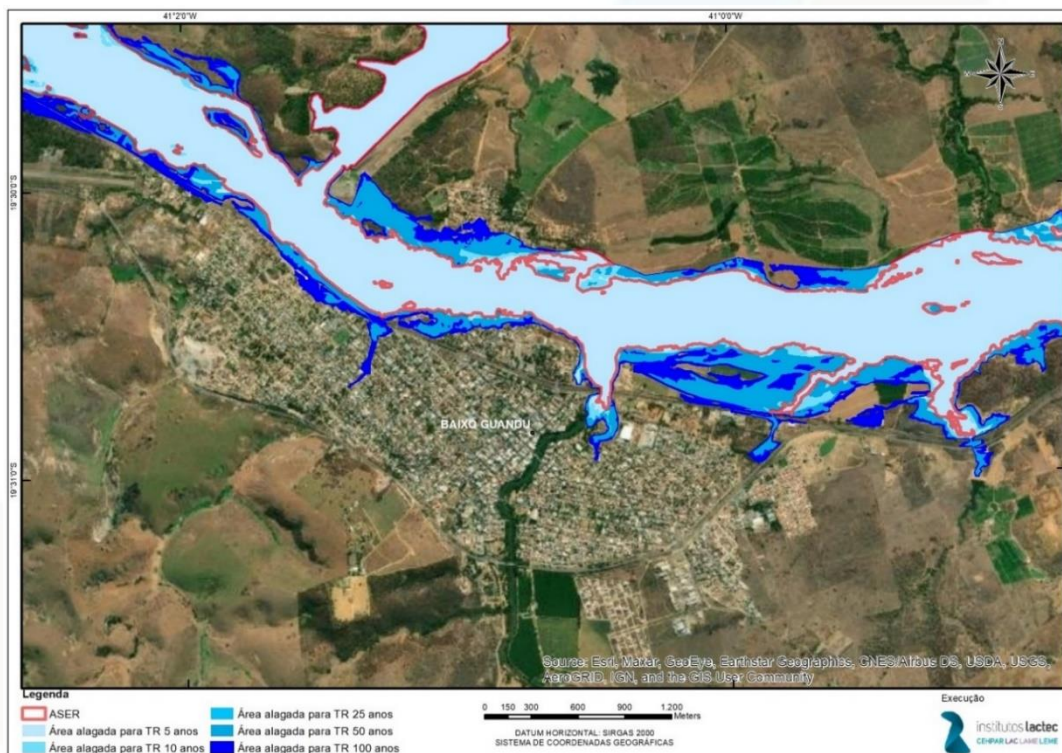
Fonte: Lactec (2020).

Figura 41 – Comparação entre áreas alagadas para vários tempos de recorrência e a ASER na cidade de Governador Valadares.



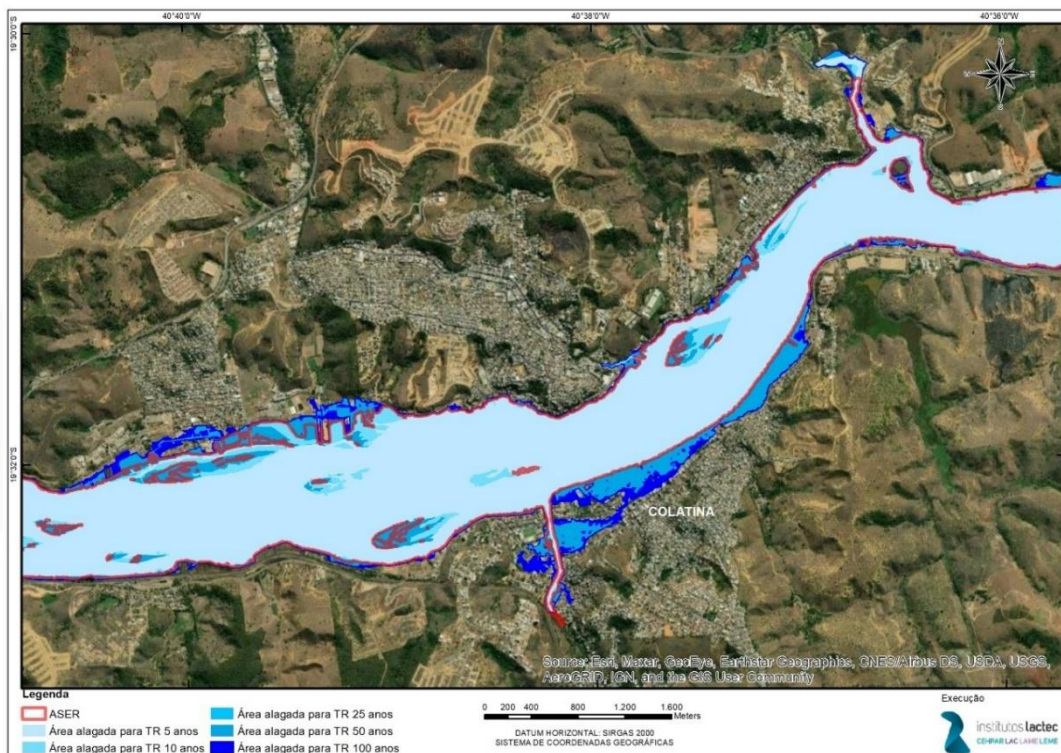
Fonte: Lactec (2020).

Figura 42 - Comparação entre Áreas alagadas para vários tempos de recorrência e a ASER na cidade de Baixo Gandu.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 43 - Comparação entre Áreas alagadas para vários tempos de recorrência e a ASER na cidade de Colatina.



Fonte: Lactec (2020).

5.2.3 CONCLUSÕES ACERCA DA MODELAGEM DA CHEIA, COTAS DE INUNDAÇÃO E TEMPOS DE RETORNO

A ASER é a região suscetível a ser atingida pelos rejeitos do desastre na ocorrência de cheias devido a ressuspensão, transporte e deposição que ocorre em períodos de cheias. Esta foi calculada para a maior cheia ocorrida após o desastre, ou seja, a de janeiro de 2020, quando ainda apresentava concentração de sedimentos atípicos para tal magnitude de vazão (concentração proveniente do rejeito ressuspendido).

Os resultados para os períodos de cheias com vários tempos de recorrência mostram as possíveis áreas a serem atingidas no futuro, caso ainda tenha rejeito no leito do rio para ser suspenso. Como este rejeito disponível do leito diminui a cada ano (devido ao despejo no mar ou a sua consolidação no leito ou nas margens) também há a diminuição da probabilidade de cheias - com tempos de recorrência maiores - possuírem rejeitos quando estas ocorrerem no futuro.

Os resultados também demonstraram o atingimento de várias lagoas próximas a Linhares com tempo de recorrência diferentes, sendo que no tempo de recorrência de 5 anos as Lagoas Nova e Juparanã já são atingidas, caso não tenham proteção com diques. Outras são atingidas em 10 anos de recorrência, como a Lagoa de Palmas, e outras somente em 25 anos de recorrência. Estes dados

reforçam o fato de que, enquanto houver rejeito no leito do rio Doce sendo ressuspenso durante as cheias, é necessário proteger estas lagoas durante a passagem das cheias, principalmente a Lagoa Nova e Juparanã, as quais são mais suscetíveis a alagamento pelas águas do rio Doce.

5.3 O EFEITO NAS LAGOAS

Complementarmente aos estudos já realizados, o presente item contempla as análises realizadas a partir das imagens de satélite para as épocas de cheias na região das lagoas próximas a foz do rio Doce, utilizando os dados processados pelo algoritmo MIP da empresa EOMAP, contratada para fornecer as imagens de parâmetros indicadores de qualidade da água. O objetivo da análise consistiu em identificar a possibilidade das águas do rio Doce terem entrado nas lagoas após o evento do rompimento, utilizando uma série histórica de imagens para eventos de cheia com menores e maiores cotas das cheias de 2016. As cheias de 2016 ocorreram dois meses após a chegada da lama do desastre na região de Linhares (ES), o que possivelmente causou a entrada das águas contaminadas do rio Doce nas lagoas.

Junto à isso, buscou-se verificar, com base em eventos similares à cheia de 2016, a possibilidade das águas do rio Doce entrarem nas lagoas localizadas próximas a sua foz, provavelmente trazendo o rejeito depositado dentro delas. Isso foi realizado pois não foi possível utilizar imagens tomadas nas datas próximas à cheia de 2016, devido a presença de nuvens e também a impossibilidade de se quantificar os dados indicadores de qualidade da água com certos satélites que fizeram imageamento da área próximo ao evento.

Além disso, foram analisados os valores de turbidez e concentração de clorofila-a em pontos específicos nas águas das lagoas e plotados em gráficos de série histórica para se verificar os padrões de cada parâmetro em diferentes pontos.

5.3.1 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO NAS LAGOAS

5.3.1.1 Primeira Análise - Cheias

Para a definição das imagens a serem utilizadas, os dados de cotas do rio Doce na estação fluviométrica de Colatina (código ANA 56994500) foram utilizados. Foram procuradas imagens próximas às datas com cotas similares a maior cota das cheias de 2016 - eventos de altas cotas que não ultrapassaram os menores valores das cheias de 2016. A Tabela 9 mostra as datas das imagens utilizadas.

Tabela 9 - Datas dos eventos de cotas elevadas e das imagens correspondentes.

Data das cheias	Data das imagens antes	Data das imagens depois	Cota Máxima (cm)	Satélite	Sensor	Suporte MIP?
07/01/1997	27/12/1996	12/01/1997	799	Landsat-5	TM+	Sim
19/01/2003	-	21/01/2003	688	Landsat-7	ETM	Não
14/01/2004	-	19/01/2004	576	CBERS-2	HRCC	Não
24/12/2013	10/12/2013	26/12/2013	890	Landsat-8	OLI	Sim
23/01/2016	-	31/01/2016	590	Resourcesat-2	LSS3	Não
08/02/2018	-	11/02/2018	592	CBERS-4	MUXCam	Não
28/01/2020	16/01/2020	31/01/2020	752	Sentinel-2	MSI	Sim

Alguns dos sensores não estão integrados no sistema MIP. Os sensores com suporte no MIP tiveram suas imagens processadas para os parâmetros indicadores de qualidade da água, sendo a turbidez utilizada na análise. Apenas as imagens com suporte no MIP foram analisadas nos períodos antes e depois dos eventos de cheias. As outras imagens sem suporte foram utilizadas para a análise visual das cheias. Os valores dos pixels foram extraídos nos pontos das estações virtuais (Tabela 10), com a finalidade de verificar de forma quantitativa a diferença entre os valores de turbidez antes e depois das cheias.

5.3.1.2 Segunda Análise – Série Histórica

A série histórica dos dados de turbidez e cloforila-a nas estações virtuais definidas, obtidos através das imagens de satélite, tiveram suas medianas plotadas em gráficos de dispersão. Os dados das missões Landsat-5, Landsat-8 (USGS e NASA) e Sentinel-2 (ESA) foram utilizados para tal. As imagens foram processadas no sistema MIP da EOMAP.

Um total de 32 estações virtuais espalhadas pelas lagoas e no rio Doce foram utilizadas para a análise dos níveis de turbidez e clorofila-a. Foi criado um polígono circular ao redor de cada ponto com raio de 50m e dados estatísticos foram calculados para cada um deles, em todas as datas. Isso foi realizado no intuito de minimizar possíveis fenômenos naturais afetando os pixels das imagens (por exemplo, vapor na atmosfera, brilho do sol, sombras de nuvens...). Os parâmetros calculados foram: desvio padrão, média, mediana, quartil 25 e quartil 75.

A Tabela 10 mostra os detalhes das estações virtuais. As coordenadas apresentadas estão no datum horizontal SIRGAS 2000.

Tabela 10 - Estações virtuais utilizadas nas análises.

Ponto	Detalhes	Latitude	Longitude
LJP01	Lagoa Juparanã	-19.352597	-40.087633
LJP02	Lagoa Juparanã	-19.350627	-40.084406
LJP03	Lagoa Juparanã	-19.219900	-40.190800
EV LJP1	Lagoa Juparanã	-19.339847	-40.093025
EV LJP2	Lagoa Juparanã	-19.306731	-40.108440
EV LJP3	Lagoa Juparanã	-19.286462	-40.128404
EV LJP4	Lagoa Juparanã	-19.177902	-40.192070
LVN01	Lagoa Nova	-19.416612	-40.155017
LVN02	Lagoa Nova	-19.387691	-40.168282
LVN03	Lagoa Nova	-19.394306	-40.150923
EV LV1	Lagoa Nova	-19.402540	-40.155802
EV LV2	Lagoa Nova	-19.380647	-40.151717
EV LV3	Lagoa Nova	-19.356603	-40.161160
EV LV4	Lagoa Nova	-19.334936	-40.175695
EV LV5	Lagoa Nova	-19.295131	-40.191001
LMN01	Desembocadura do canal que liga o rio Doce e a Lagoa Monsarás	-19.558824	-39.801345
LMN02	Lagoa Monsarás	-19.554262	-39.770807
LAL01	Lagoa Areal	-19.585500	-39.828000
LAO01	Lagoa Areão	-19.575900	-39.841700
LAO02	Lagoa Areão	-19.570500	-39.844000
EV RDL3	Rio Doce, próximo a lagoa do Limão	-19.516152	-40.343218
EV RDL4	Rio Doce, próximo a lagoa do Limão	-19.514040	-40.327270
EV RDL5	Rio Doce	-19.493784	-40.288610
EV RDL6	Rio Doce	-19.476907	-40.224690
EV RDL7	Rio Doce	-19.447226	-40.175292
EV RDL8	Rio Doce, próximo a Lagoa Nova	-19.433096	-40.141865
EV RDL9	Rio Doce, Linhares, próximo a desembocadura do canal que liga o rio à Lagoa Juparanã	-19.406781	-40.069229
EV RDL10	Foz do rio Doce	-19.645994	-39.817175
RDO15	Ponte sobre o rio Doce na BR 101 na saída de Linhares	-19.408411	-40.065427
RDO16	Porto de Regência	-19.646325	-39.822347
EV FOZ	Ponto no oceano, 1km ao sul da foz	-19.662151	-39.812417

As figuras (Figura 44 e Figura 45) abaixo apresentam as localizações das estações virtuais.