

1.1. INFRAESTRUTURA

Os riscos associados à infraestrutura devido às mudanças climáticas estão diretamente ligados a impactos que afetam tanto o transporte de bens e serviços quanto a mobilidade dos cidadãos, além do fornecimento e transmissão de energia elétrica. Eventos como precipitações intensas, ventos fortes, incêndios florestais, deslizamentos e inundações podem comprometer a integridade de estradas, ferrovias, portos e aeroportos, além de causar interrupções no fornecimento de energia e danos às redes de transmissão.

A intrusão salina em rios, resultante da elevação do nível do mar, agrava a escassez de recursos hídricos, afetando não apenas o abastecimento de água doce, mas também as operações de usinas hidrelétricas que dependem de volumes consistentes de água. Além disso, a erosão costeira, intensificada pela alteração no regime de ondas e pela subida do nível do mar, provoca uma reconfiguração das praias e zonas costeiras, ameaçando infraestruturas localizadas nessas áreas, como portos, estradas e instalações industriais.

Esses impactos ressaltam a necessidade de adaptação e planejamento de longo prazo, visando à resiliência da infraestrutura frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

1.1.1. Fatores e eventos climáticos relevantes para infraestrutura

Sobrelevação do NMM

A sobrelevação do nível médio do mar (NMM) pode causar o aumento da salinização do trecho final de rios (cunha salina alcançando trechos mais a montante nos estuários) em períodos de seca prolongada. Em estuários de rios onde há captação para abastecimento, o maior teor de sais na água poderá inviabilizar captações existentes durante vários meses do ano. Atualmente, em períodos de estiagem prolongada de alguns meses, São Mateus (Rio Cricaré/São Mateus), Serra (Rio Reis Magos), Marataízes e Itapemirim (Rio Itapemirim) já sofrem com esta situação.

Com a sobrelevação do NMM, haverá um aumento da frequência com que níveis mais altos de maré estarão presentes em estuários e em canais de drenagem, aumentando a ocorrência de inundações durante chuvas intensas. A combinação mais danosa para o NMM é chuva muito intensa em horários de maré alta.

O Espírito Santo tem diversos núcleos urbanos susceptíveis a inundações ocasionadas pela sobrelevação do NMM, pois seus canais de drenagem são influenciados pela maré e contam com extensas áreas urbanas vulneráveis a inundação que podem ainda impedir o fornecimento de energia elétrica.

Cidades costeiras do Espírito Santo, de diferentes portes, estão instaladas ou tem parte de sua zona urbana sobre a planície costeira, em baixa altitude e com muita pouca declividade para escoamento da drenagem. As maiores são Vitória, Vila Velha e Cariacica, nas quais há trechos de ruas onde atualmente a maré de sizígia já atinge as sarjetas. Mas, praticamente todos os

núcleos urbanos ao longo da costa tem problemas de drenagem em suas áreas mais baixas, e com chuvas mais intensas e sobrelevação do NMM, as inundações tendem a ser mais severas.

Vitória e Vila Velha atualmente contam com estações de bombeamento de águas pluviais (EBAP) (Figura 1) e comportas automatizadas, que atuam para diminuir os efeitos das inundações quando da ocorrência de chuvas intensas em períodos de marés altas. Obras de ampliação da capacidade dos canais de macrodrenagem que alimentam as EBAPs têm aumentado a eficácia desses sistemas.

A elevação do nível do mar representa uma ameaça significativa para a infraestrutura de transporte, especialmente para estradas e rodovias costeiras, que muitas vezes são as principais rotas de acesso a comunidades e centros urbanos. Com a subida das águas, esses corredores enfrentam inundações frequentes durante marés altas e eventos de tempestade. A água invade e enfraquece o asfalto e o solo de fundação, comprometendo a estabilidade e acelerando a erosão sob as vias, aumentando o risco de colapso parcial ou total. Pontes costeiras também são altamente vulneráveis, uma vez que a intrusão de água salina pode corroer suas fundações submersas, exigindo manutenção constante para preservar a segurança estrutural.

A infraestrutura elétrica enfrenta desafios igualmente graves com a elevação do nível do mar, sobretudo em subestações, linhas de transmissão e cabos subterrâneos nas áreas litorâneas. Subestações elétricas, muitas vezes situadas perto do litoral para atender as cidades costeiras, ficam sujeitas a inundações que podem danificar equipamentos, causar curto-circuitos e interromper o fornecimento de energia. A intrusão de água salgada é especialmente corrosiva e acelera a degradação dos equipamentos elétricos, o que eleva os custos de manutenção e reduz a vida útil de componentes essenciais. Além disso, as linhas de transmissão que cruzam áreas costeiras correm o risco de queda se o solo for erodido ou se tornar instável devido à intrusão do mar, comprometendo a confiabilidade do fornecimento de energia e criando desafios técnicos para o posicionamento seguro de equipamentos.

Para o abastecimento de água, a elevação do nível do mar representa problemas críticos, particularmente pela intrusão salina em aquíferos e mananciais próximos ao litoral. A entrada de água salgada contamina aquíferos costeiros, tornando a água doce inadequada para consumo sem tratamento adicional, o que exige a instalação de sistemas caros de dessalinização ou a exploração de novas fontes em áreas mais distantes. A infraestrutura de captação e distribuição também sofre com a intrusão salina e as inundações, que podem danificar tubulações e reduzir a eficiência dos sistemas de bombeamento e reservatórios. Em casos extremos, a escassez de água potável pode forçar a realocação de comunidades e exigir altos investimentos para assegurar o abastecimento.

Os sistemas de esgoto e drenagem também são fortemente impactados pela elevação do nível do mar. Redes de esgoto subterrâneas em áreas costeiras ficam sujeitas a inundações, que podem provocar o transbordamento de esgoto e a contaminação de vias públicas, rios e praias. A sobrecarga dos sistemas de esgoto durante marés altas compromete a capacidade de tratamento adequado, aumentando o risco de surtos de doenças relacionadas à falta de saneamento. Além disso, a intrusão salina pode corroer tubulações e reduzir a capacidade de bombeamento nas estações de tratamento. O aumento do nível do mar também interfere no

escoamento da água da chuva através dos sistemas de drenagem, intensificando o risco de enchentes e de alagamentos crônicos em áreas urbanas costeiras.

Erosão costeira

A mudança climática altera a distribuição de calor na atmosfera, e consequentemente o padrão de ventos e tempestades no Oceano Atlântico, onde são geradas as ondas que atingem a costa do Espírito Santo (Neves & Muehe, 2005). Assim, a mudança climática modifica dois fatores que impactam a forma das praias: ondas incidentes e a sobrelevação do NMM, podendo alterar significativamente a forma das praias, causando erosão em alguns trechos da linha de costa e crescimento (acréscimo/progradação) em outros.

A elevação do nível do mar também inunda terras baixas, desloca sedimentos e reduz a capacidade natural da costa de se recuperar, uma vez que os sistemas de deposição de sedimentos são alterados. Isso leva à perda progressiva de terra e à diminuição das zonas de praia, afetando não apenas os ecossistemas, mas também as comunidades humanas que dependem dessas áreas.

Outro evento climático exacerbado pelas mudanças climáticas são as tempestades. Tempestades tropicais cada vez mais potentes, trazem ventos fortes e ondas altas, que causam erosão acelerada em áreas costeiras, especialmente durante eventos como marés de tempestade. As ondas intensificadas retiram grandes quantidades de areia e sedimentos das praias, o que pode resultar na perda de faixas costeiras inteiras, além de danos às infraestruturas costeiras, como estradas, prédios e diques. Em muitos casos, a erosão causada por tempestades é tão severa que as praias não conseguem se regenerar naturalmente entre um evento extremo e outro, agravando a perda de solo.

O Espírito Santo tem casos de erosão costeira de norte a sul (Albino et al. 2018), sendo que alguns trechos de praias junto a regiões urbanizadas receberam obras de proteção ao longo dos últimos anos (Figura 2). Atualmente, há demanda por proteção das praias centrais de Anchieta e Piúma (erosão de calçadas e ruas), e de trecho de praia imediatamente ao norte da desembocadura do Rio Itapemirim (erosão pode atingir a ES 060).

Os processos de erosão costeira têm impactos profundos sobre a infraestrutura de transporte, energia, abastecimento de água e saneamento nas regiões litorâneas.

Na infraestrutura de transportes, a erosão costeira pode causar danos severos, atingindo estradas, rodovias e ferrovias localizadas próximas ao litoral. Com o avanço do mar, as fundações dessas vias são comprometidas, levando ao colapso de trechos de estradas e pontes. Em muitas áreas costeiras, rodovias que margeiam o oceano são vitais para a mobilidade de pessoas e mercadorias, e a erosão nessas áreas pode isolar comunidades inteiras, além de gerar elevados custos de reparo e realocação. Ferrovias também são particularmente vulneráveis: a instabilidade do solo nas proximidades da costa pode provocar afundamentos e deslocamentos das linhas, interrompendo o transporte de cargas e passageiros.

A infraestrutura elétrica é igualmente afetada pela erosão costeira. Linhas de transmissão e torres de energia instaladas perto da costa estão em risco de desestabilização e colapso devido à retirada de sedimentos, enquanto subestações localizadas em áreas costeiras estão suscetíveis

à inundação pela intrusão do mar. Esse tipo de inundação pode provocar curto-circuitos e interrupções no fornecimento de energia em larga escala. A restauração dessas estruturas é frequentemente dificultada pela contínua instabilidade do solo e pela necessidade de reposicioná-las em áreas mais seguras, o que pode se tornar economicamente inviável.

No abastecimento de água, a erosão costeira compromete diretamente os sistemas de captação e distribuição de água potável. Muitas redes dependem de reservatórios e tubulações próximas à costa, que são afetadas pela proximidade do mar. Além disso, a intrusão salina, causada pela elevação do nível do mar, contamina aquíferos e fontes de água doce, tornando-a inadequada para consumo e exigindo processos caros de dessalinização ou a busca de novas fontes em locais mais distantes. Tubulações próximas à costa também estão sujeitas a rupturas e deslocamentos, o que interrompe o fornecimento e exige reparos complexos e dispendiosos.

Os sistemas de esgoto e drenagem sofrem igualmente com a erosão costeira. Redes de esgoto em áreas litorâneas podem ser danificadas ou destruídas à medida que o solo costeiro é compactado ou removido pela ação do mar. Isso pode causar o vazamento de esgoto no meio ambiente, contaminando praias, rios e oceanos, o que gera sérios riscos à saúde pública e danos ambientais. A destruição de estações de tratamento localizadas em zonas costeiras pode levar à paralisação dos serviços de saneamento, expondo a população a doenças transmitidas pela água contaminada. A erosão também afeta os sistemas de drenagem urbana, reduzindo sua capacidade de lidar com a água da chuva e levando a inundações frequentes em áreas urbanas.

Chuvas extremas

Chuvas extremas podem ser definidas como eventos com grande quantidade de chuva, extensa duração (em dias) e grande abrangência territorial (Teixeira e Pietro, 2020). As chuvas extremas podem ser caracterizadas como:

Chuvas volumosas, com duração de muitos dias, decorrente da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuvas volumosas nas regiões Centro-Oeste e Sudeste entre o fim da primavera e o verão. Entre os meses de novembro e fevereiro, os episódios de ZCAS se formam, com duração de quatro a dez dias em média, e podem ocorrer vários episódios ao longo desses meses.

Chuvas intensas, com duração de algumas horas, com influência orográfica. São chuvas com duração de poucas horas, que acontecem principalmente no verão, quando sistemas de nuvens alcançam regiões do estado voltadas para o mar, principalmente no centro-sul, na face das montanhas virada para o mar (a barlavento). Essas precipitações extremas são tipicamente de mais de 200 mm em menos de 24 h. Quando atingem pequenas bacias hidrográficas que tem muita declividade, provocam a elevação súbita do nível d'água dos rios, e escoamentos com muita velocidade (enxurradas).

O Espírito Santo tem muitos núcleos urbanos situados em fundos de vales à beira de rios, onde muitas habitações, infraestruturas e equipamentos públicos estão sujeitos a inundação decorrentes de chuvas extremas.

Chuvas extremas causam impactos severos em infraestruturas de transporte, elétrica, abastecimento de água e esgoto, provocando danos físicos, interrupções de serviços e grandes prejuízos econômicos.

No setor de transporte, chuvas extremas causam alagamentos em estradas, pontes e ferrovias, interrompendo o fluxo de veículos e mercadorias. As rodovias podem se tornar intransitáveis devido ao acúmulo de água, e os sistemas de drenagem muitas vezes falham em escoar o volume excedente, agravando as inundações. Além disso, chuvas fortes podem enfraquecer a estrutura de pontes, ocasionando colapsos parciais ou totais, enquanto o transporte ferroviário é frequentemente interrompido pelo risco de erosão do leito das vias ou deslizamentos de terra nas áreas adjacentes. Essa interrupção afeta diretamente a logística de suprimentos, gera atrasos no transporte de bens essenciais e causa grandes prejuízos à economia local e regional.

A infraestrutura elétrica também é fortemente afetada por chuvas extremas. Alagamentos danificam subestações de energia e equipamentos de transmissão, resultando em falhas no fornecimento de eletricidade. Linhas de transmissão podem ser derrubadas por ventos fortes ou quedas de árvores durante tempestades. Em áreas urbanas, transformadores expostos correm o risco de curtos-circuitos, resultando em blecautes que afetam milhares de consumidores, incluindo hospitais e serviços essenciais. A restauração do fornecimento de energia em meio a inundações é desafiadora, pois o solo encharcado e as áreas alagadas dificultam o acesso das equipes de manutenção, além de aumentarem os riscos de acidentes.

No abastecimento de água, chuvas extremas sobrecarregam os sistemas de captação e tratamento. Durante tempestades, rios e reservatórios podem transbordar, comprometendo a infraestrutura de distribuição de água. A qualidade da água também se deteriora, pois, a enxurrada carrega grandes quantidades de sedimentos, detritos e poluentes, contaminando mananciais. Em regiões onde o abastecimento depende de fontes superficiais, a turbidez da água aumenta, dificultando o tratamento adequado e, em casos extremos, interrompendo o fornecimento. Além disso, chuvas intensas podem danificar redes de distribuição, provocando vazamentos e desperdícios.

Os sistemas de esgoto e drenagem urbana são particularmente vulneráveis a chuvas extremas. A sobrecarga dos sistemas de esgoto, especialmente em áreas com infraestrutura deficiente, pode resultar no transbordamento de esgoto para vias públicas e rios, contaminando o meio ambiente e criando sérios riscos à saúde pública. Os sistemas de drenagem urbana, projetados para escoar volumes menores de água, muitas vezes não conseguem lidar com precipitações extremas, levando a enchentes em áreas urbanas. Esses alagamentos causam danos a residências, comércios e indústrias, aumentando os custos de reparo e limpeza. O entupimento de galerias pluviais com lixo e sedimentos agrava ainda mais o problema, reduzindo a capacidade de escoamento das águas da chuva.

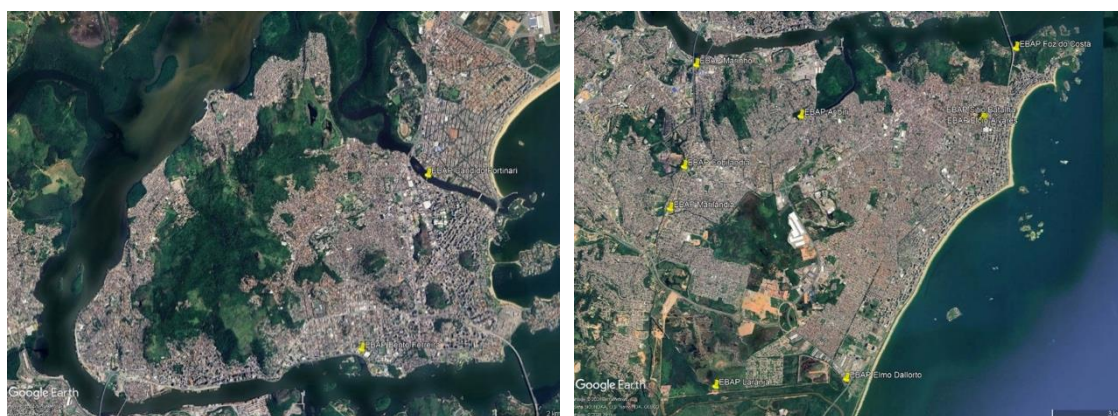
Deslizamentos

Deslizamentos de terra estão diretamente relacionados a chuvas extremas. Essencialmente, os deslizamentos ocorrem quando o equilíbrio entre a força gravitacional que age sobre o solo e a resistência do terreno é rompido. As chuvas extremas alteram a estabilidade do solo e, muitas vezes, provocam sua movimentação. Quando a precipitação é intensa ou prolongada, o solo absorve grandes quantidades de água, levando-o à saturação. À medida que a água penetra nos poros do solo, o peso da massa de terra aumenta, enquanto a coesão entre as partículas e a

resistência ao cisalhamento diminuem. Essa saturação faz com que o solo perca sua capacidade de resistir à gravidade, tornando-se muito mais suscetível a escorregamentos.

Em encostas íngremes, o impacto da chuva pode desagregar a camada superficial do solo, removendo partículas e acumulando detritos no pé das encostas, o que aumenta o risco de futuros deslizamentos e contribui para a instabilidade dessas áreas. Chuvas prolongadas também desempenham um papel importante: a exposição do solo a períodos contínuos de precipitação, mesmo que de baixa intensidade, causa uma saturação gradual. Isso significa que, ao longo de dias ou semanas, o solo vai perdendo sua estabilidade, ficando mais vulnerável a deslizamentos que podem ser desencadeados até por chuvas de menor intensidade em eventos subsequentes.

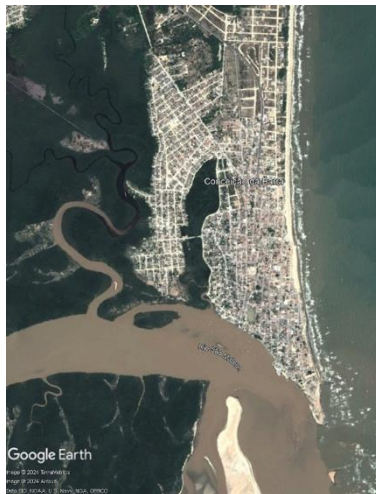
Os deslizamentos de terra têm impactos significativos sobre as infraestruturas de transporte, redes elétricas, abastecimento de água e saneamento, gerando consequências econômicas e sociais expressivas. No caso da infraestrutura de transporte, os deslizamentos podem bloquear estradas, ferrovias e pontes, impedindo a circulação de pessoas e mercadorias. Esse bloqueio, além de provocar atrasos e prejuízos econômicos, pode isolar comunidades inteiras, dificultando o acesso a serviços essenciais e operações de socorro em emergências. A reconstrução dessas vias, muitas vezes danificadas ou destruídas, é um processo caro e demorado, que pode levar meses ou até anos, dependendo da magnitude do desastre e da complexidade do terreno.



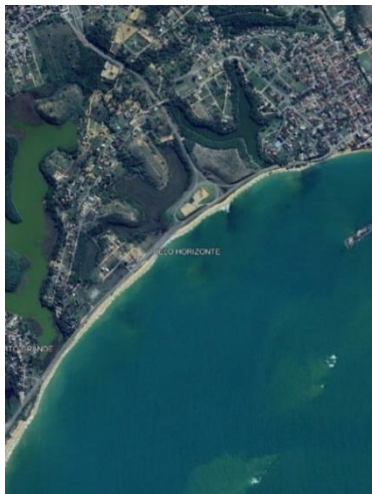
(a)

(b)

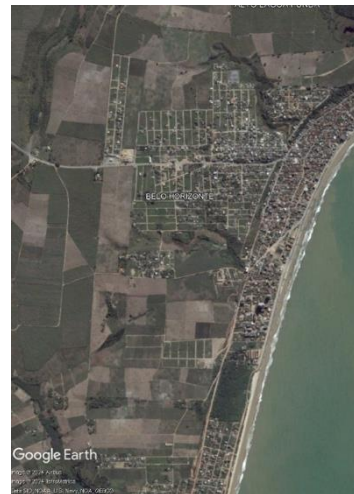
Figura 1 Mapa de localização das EBAP de (a) Vitória e (b) Vila Velha.



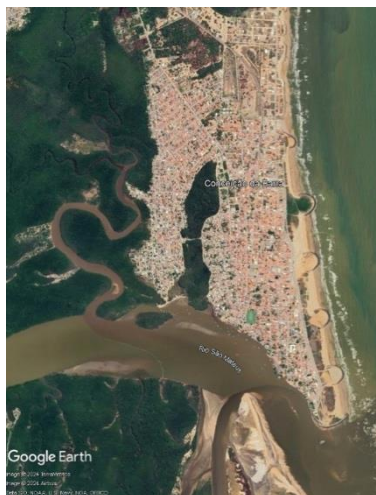
Conceição da Barra em 2010



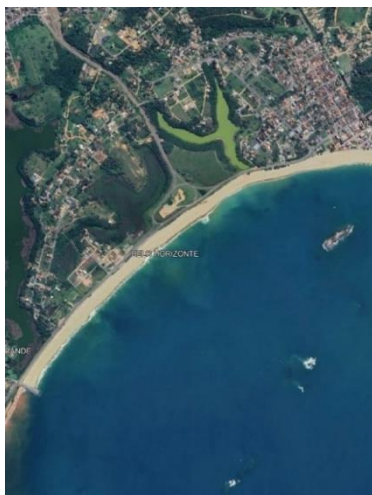
Meaípe em 2022



Marataízes em 2010



Conceição da Barra em 2024



Meaípe em 2024



Marataízes em 2024

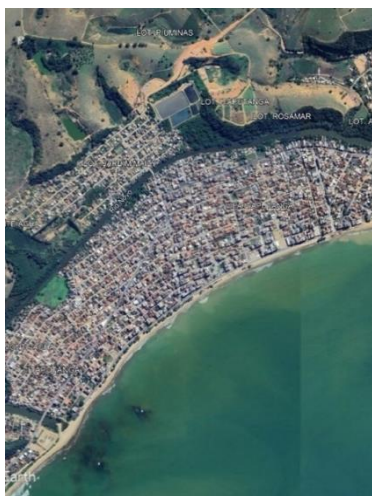
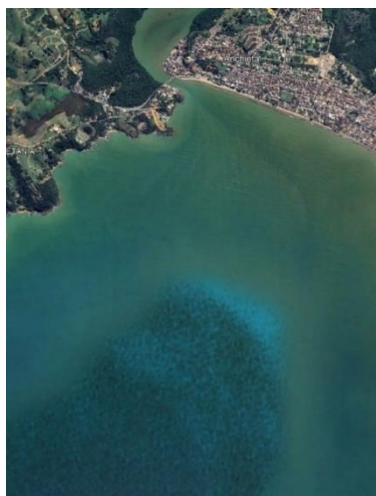


Figura 2 Trechos de praias no Espírito Santo que receberam obras de proteção.

As redes de transmissão de energia elétrica também são fortemente impactadas. Linhas de transmissão e torres localizadas em áreas montanhosas ou encostas podem ser derrubadas pela movimentação de terra, resultando em interrupções no fornecimento de eletricidade para grandes regiões. Essas falhas afetam residências, indústrias e serviços críticos, como hospitais e estações de tratamento de água. Em alguns casos, a recuperação das redes elétricas é dificultada pela instabilidade do solo, prolongando as interrupções de energia e agravando os prejuízos econômicos e sociais.

O abastecimento de água também sofre significativamente com deslizamentos. Tubulações e reservatórios podem ser destruídos, interrompendo o fornecimento de água potável para áreas urbanas e rurais. Além disso, a movimentação de grandes volumes de terra pode contaminar rios e mananciais, comprometendo a qualidade da água e exigindo maiores esforços de tratamento. Em muitas regiões rurais, o desvio ou soterramento de nascentes e rios provoca escassez de recursos hídricos, dificultando o acesso à água.

Os sistemas de esgoto e drenagem são igualmente vulneráveis aos deslizamentos de terra. Tubulações de esgoto que cruzam áreas de encostas podem ser rompidas ou bloqueadas, resultando em vazamentos que contaminam o solo e a água, criando sérios riscos sanitários para a população. Além disso, os sistemas de drenagem urbana, projetados para canalizar a água da chuva, podem ser obstruídos pelos detritos dos deslizamentos, aumentando o risco de inundações em áreas habitadas. O colapso desses sistemas não só compromete a infraestrutura de saneamento, mas também expõe as populações a doenças, exacerbando as condições de vida.

1.1.2. Danos a infraestrutura associados aos desastres climáticos

Dados sobre perdas humanas e econômicas decorrentes de desastres confirmam a hipótese de que eventos naturais extremos têm impacto negativo na infraestrutura e no desenvolvimento do estado. No cenário atual, em que se observa um aumento gradual na frequência desses desastres, identificar onde essas perdas ocorrem é crucial para planejar de forma mais eficaz as intervenções necessárias na infraestrutura.

Nesse contexto, esta seção resume os resultados de um estudo realizado pelo Banco Mundial em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (Banco Mundial et al., 2020), com o objetivo de quantificar os danos materiais e prejuízos causados por desastres naturais no Brasil, com foco específico nos danos em infraestrutura e no estado do Espírito Santo.

Os maiores danos e prejuízos para o país, cerca de R\$ 199,83 bilhões, estão associados a estiagem e seca. Entretanto esses gastos não estão inteiramente relacionados com infraestrutura (apenas 0,16% ou cerca de R\$ 323 milhões). Os maiores gastos na área de infraestrutura estão associados principalmente a enxurradas (R\$ 18 bilhões) e inundações (R\$ 9 bilhões), seguidos por chuva intensa (R\$ 4 bilhões) e movimentos de massa (R\$ 2 bilhões). Os

gastos com alagamentos, granizo e vendavais/ciclones também são significativos, cerca de R\$ 1bilhão cada um.

O ES ocupa a 10ª posição no ranking de danos materiais em infraestrutura. É importante notar, que ao normalizar os danos materiais em infraestrutura pelo PIB dos estados, o ES passa a ocupar a 5ª posição no ranking, sendo o estado com maiores danos materiais em infraestrutura em relação PIB da região sudeste. Proporcionalmente ao PIB, o ES (0,91%) teve mais que o dobro dos danos materiais em infraestrutura que o RJ (0,42%) ou mais de 6 vezes os gastos de SP.