

MODELO CONCEITUAL MULTISSÍTIOS COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA GESTÃO DE *BROWNFIELDS*: O CASO DO ARCO JURUBATUBA (BRASIL)

 Marcos Sillos ^{1,2*},  Graça Brito ^{1,2},  Alexandra Suhogusoff ³,  Paula F. da Silva ^{1,2}

¹ GeoBioTec – Pólo NOVA; Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2829-516, Caparica, Portugal. E-mails: marcos@edutechambiental.com.br, mgb@fct.unl.pt, apfs@fct.unl.pt

² Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal.

³ Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, CEP: 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: suhogusoff@usp.br

*Autor correspondente



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

RESUMO

Áreas contaminadas trazem distintos desafios para a sociedade, tanto em sua amplitude de gestão, como na atribuição das responsabilizações legais e financeiras para sua mitigação, sendo esse cenário agravado quando se analisam zonas urbanas degradadas por múltiplos sítios (multissítios) com passivos ambientais (*brownfields*). Muitos problemas são resultantes da própria gestão dessas áreas, destacando-se a dificuldade de diálogo entre responsáveis legais, eventual existência de áreas contaminadas órfãs, além de conflitos entre autoridades públicas, dificultando o controle ambiental adequado do risco toxicológico existente. Disso decorrem inúmeros casos em que a judicialização, como instrumento de gestão, se torna uma estratégia preferencial, permitindo a protelação de investimentos pelos agentes poluidores, tornando secundária a solução do passivo ambiental. Derivam-se, portanto, impactos sociais e ambientais diversos decorrentes da demora na ação remediativa das áreas em pauta. Nesse contexto, a situação ambiental apontada necessitaria do desenvolvimento de um novo modelo conceitual de gestão de áreas contaminadas regionalizado em que o consorciamento entre agentes poluidores, tutelado pelo Estado, possa ser referido como alternativa eficaz ao controle dos riscos existentes. Nesse modelo conceitual de controle ambiental, a mensuração de preferências que a sociedade tenha quanto à melhor forma de gestão do meio ambiente e a mitigação dos passivos ambientais deve ser considerada, permitindo-se qualificar critérios de maior relevância em um projeto de remediação sustentável, analisando e discutindo a abrangência das externalidades e o impacto financeiro da solução. Este trabalho apresenta um caso de passivo em área multissítio existente na cidade de São Paulo (SP), Brasil, denominada Arco Jurubatuba. Nessa região há um histórico de inúmeros sítios de empresas de diversos setores produtivos qualificadas como áreas contaminadas, com agravamento ao risco ambiental derivado do adensamento populacional local, oriundo da mudança de uso dessa zona de industrial para residencial. A abordagem, considerando o contexto multissítios, desenvolvida no trabalho, visa a apresentar uma recomendação de modelo conceitual de gestão regional, que leve em consideração estudos de intrusão de vapores (IV) originários do solo e aquíferos locais severamente impactados por solventes clorados, que constituem fontes de riscos toxicológicos à população exposta. Nesse sentido, o mapeamento de gases em subsuperfície e a avaliação de seu risco possibilitarão o desenvolvimento de uma estratégia de drenagem e tratamento desses gases, saneando a região contra eventuais riscos à saúde humana. Por fim, o desenvolvimento de um modelo conceitual

específico para investigação de passivos ambientais em áreas multissítios permitirá maior sensibilidade na avaliação de perigos e/ou riscos e alerta para a necessidade de mudança de paradigmas de controle de impactos ambientais por parte do Estado, conferindo maior segurança à população local.

Palavras-chave: Remediação Ambiental, Mudanças Climáticas, Resiliência, Gestão de Áreas Complexas, Áreas Multissítio, Modelo Consorciado.

ABSTRACT

MULTISITE CONCEPTUAL MODEL AS A STRATEGIC TOOL FOR BROWNFIELDS MANAGEMENT: THE CASE OF ARCO JURUBATUBA (BRAZIL). Contaminated areas present distinct challenges for society, both in the scope of their management and in the assignment of legal and financial responsibilities for their mitigation, a scenario aggravated when dealing with degraded urban zones by multiple sites (multi-sites) with environmental liabilities (*brownfields*). Many problems are attributed to the management of these areas, highlighting the difficulty of dialogue among legally responsible parties, possible existence of orphan contaminated areas, and conflicts between public authorities, hindering proper environmental control of the existing toxicological risk. Numerous cases arise where judicialization, as a management tool, becomes a preferred strategy, allowing polluting agents to delay investments, regrettably relegating the solution of environmental liabilities to a secondary status. Consequently, various social and environmental impacts derive from the delay in remedial action in the areas in question, with the aggravation caused by externalities in public areas existing in these scenarios addressed in this study. This study presents a case of multi-site environmental liability in the city of São Paulo (SP), Brazil, called Arco Jurubatuba. The approach aims to recommend a regional management conceptual model that considers vapor intrusion studies (VI) originating from the local aquifer, a possible source of toxicological risks to the affected population. This region has a history of hundreds of industries from various sectors, indicating multiple contaminated areas with constant aggravation of environmental risk due to local population densification arising from the land use change from industrial to residential zones. In this context, the indicated environmental situation calls for the development of a new regionalized conceptual management model for contaminated areas, in which the solution among polluting agents, overseen by the State, can be seen as an effective alternative for managing existing risks. In this conceptual model of environmental control, public preferences regarding the best form of environmental management and mitigation of environmental liabilities should be considered, allowing the qualification of the most relevant criteria in a sustainable remediation project, analyzing and discussing the scope of externalities and the financial impact of the solution. The development of a specific Conceptual Model for investigating environmental liabilities in multi-site areas allows greater sensitivity in risk assessment and highlights the need for changes in State environmental impact control paradigms, providing greater safety to the local population.

Keywords: Environmental Remediation, Climate Change, Resilience, Complex Areas Management, Consortium Mode.

RESUMEN

MODELO CONCEPTUAL MULTISITIO COMO HERRAMIENTA ESTRATÉGICA PARA LA GESTIÓN DE BROWNFIELDS: EL CASO DE ARCO JURUBATUBA (BRASIL). Las áreas contaminadas presentan distintos desafíos para la sociedad, tanto en su amplitud de gestión como en la asignación de responsabilidades

legales y financieras para su mitigación, siendo este escenario agravado cuando se analizan zonas urbanas degradadas por múltiples sitios (multisitios) con pasivos ambientales (*brownfields*). Muchos problemas se atribuyen a la gestión de estas áreas, destacándose la dificultad de diálogo entre los responsables legales, la posible existencia de áreas contaminadas huérfanas, además de los conflictos entre autoridades, lo que dificulta el control ambiental adecuado del riesgo toxicológico existente. De ello derivan numerosos casos en los que la judicialización, como instrumento de gestión, se convierte en una estrategia preferencial, permitiendo la postergación de inversiones por parte de los agentes contaminantes, relegando lamentablemente la solución del pasivo ambiental a un segundo plano. Por tanto, se derivan diversos impactos sociales y ambientales por la demora en la acción remedial en las áreas en cuestión, abordándose en este estudio el agravamiento provocado por externalidades en áreas públicas existentes en estos escenarios. El texto presenta un caso de pasivo en área multisitio existente en la ciudad de São Paulo (SP), Brasil, denominado Arco Jurubatuba. La propuesta busca presentar una recomendación de modelo conceptual de gestión regional que contemple estudios de intrusión de vapores (IV) originados en el acuífero local, posible fuente de riesgos toxicológicos para la población afectada. En esta región existe un historial de cientos de industrias de diversos sectores, con indicación de múltiples áreas contaminadas con agravamiento constante del riesgo ambiental derivado del aumento poblacional local, originado por el cambio de uso de esta zona industrial a áreas residenciales. En este contexto, la situación ambiental señalada requeriría el desarrollo de un nuevo modelo conceptual regionalizado de gestión de áreas contaminadas, en que la solución entre agentes contaminantes, tutelada por el Estado, pueda ser referida como una alternativa eficaz para la gestión de los riesgos existentes. En este modelo conceptual de control ambiental, se debe considerar la medición de las preferencias que la sociedad tiene respecto a la mejor forma de gestionar el medio ambiente y mitigar los pasivos ambientales, permitiendo calificar los criterios de mayor relevancia en un proyecto de remediación sostenible, analizando y discutiendo la amplitud de las externalidades y el impacto financiero de la solución. El desarrollo de un Modelo Conceptual específico para la investigación de pasivos ambientales en áreas multisitio posibilita mayor sensibilidad en la evaluación de riesgos y sobre la necesidad de cambio de paradigmas en el control estatal de impactos ambientales, brindando mayor seguridad a la población local.

Palabras clave: Remediación Ambiental, Cambio Climático, Resiliencia, Gestión de Áreas Complejas, Modalidad Consorcio.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O desenvolvimento de modelos conceituais é uma etapa gerencial fundamental na recuperação de *brownfields* e no redesenvolvimento urbano, pois fornece a base para entender riscos toxicológicos decorrentes de contaminações de solo e águas subterrâneas (Gavrilas et al., 2025), além de comunicar informações de forma eficaz e planejar estratégias de gestão adequadas (Hart et al., 2021). A recuperação de *brownfields* em zonas urbanas constitui um tema central na discussão do acesso à cidade, da gentrificação e, conseqüentemente, dos impactos ambientais nas dinâmicas climáticas globais (Goosen & Fitchett, 2019; Wei et al., 2025).

Brownfields são áreas urbanas degradadas onde a contaminação do solo e da água subterrânea

é frequente, exigindo soluções específicas para sua recuperação (Hou et al., 2023; Wei et al., 2025). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (USEPA, sigla em inglês), os *brownfields* são “bens imóveis, cuja expansão, remodelação ou reutilização possam ser complicados pela presença ou potencial presença de uma substância perigosa, poluente ou contaminante” (Strom, 2018). Chen et al. (2018) destacam a relação próxima entre os processos de urbanização e a industrialização das cidades durante seu desenvolvimento, bem como a etapa posterior de desindustrialização e a descoberta de *brownfields* complexos. O problema de *brownfields* da década de 1970 que assolou diversos territórios recém-desenvolvidos e gerou problemas econômicos e até crescimento da atividade criminosa

foi um ponto de partida para se pensar a revitalização e reutilização de *brownfields* como ferramenta para o desenvolvimento econômico, ambiental e social (Chen et al., 2018; Vestbro, 2007). Segundo Liao (2023), a gestão do espaço urbano deve passar por uma discussão acerca da vocação das áreas recuperadas, a qual envolve aspectos econômico e de heterogeneidade cultural da população local, mas que oferece oportunidades de novos empreendimentos, além de uma discussão estética relativa à sua historicidade, visando-se a criar uma paisagem com características regionais adequadas a uma nova ocupação.

Quando um *brownfield* abrange uma grande área geográfica com múltiplas fontes de contaminação, recomenda-se uma abordagem integrada entre os diferentes sítios da região, que deve ser reconhecida como uma área multissítios (ou *multi-site*, em inglês) para fins de gerenciamento ambiental (Barbosa et al., 2017; Hart et al., 2021). Ainda, como conceituação, a USEPA (2023) define *multi-sites* como áreas com valor de remediação superior a 50 milhões de dólares, ou de atividade industrial maior que 1000 acres de extensão e apropriada para redensolvimento econômico-urbano (NICOLE, 2023). Ao contrário do modelo de uma área contaminada isolada, o conceito de multissítios envolve plumas combinadas (Hart et al., 2023), uma rede complexa de responsáveis legais públicos e privados e alta complexidade técnica e institucional, o que torna o gerenciamento tradicional ineficaz e exige abordagens integradas e ferramentas avançadas de gestão de dados ambientais (Barbosa et al., 2017).

Os *brownfields* estão presentes em quase todos os países do hemisfério norte. A USEPA (2024) estima a existência de mais de 450 mil *brownfields* no país. Na Europa, segundo levantamento de Oliver et al. (2014), países como Polônia e Romênia somam mais de 8.000 km² de *brownfields*, enquanto Portugal, Espanha, Áustria e Itália possuem menos de 1.000 km² cada. No Brasil, não existe uma estimativa consolidada da área ocupada por *brownfields* no país, no entanto, o Estado de São Paulo registra 7.138 Áreas Contaminadas e Reabilitadas (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo/Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística [CETESB/SEMIL], 2025a), sendo cerca de 4.000 na bacia do Alto Tietê, onde se destaca a região do Arco Jurubatuba, marcada por múltiplos passivos ambientais.

A reutilização de *brownfields* para o desenvolvimento urbano depende, inicialmente, da elaboração de um modelo conceitual que considere a complexidade dos sítios, sejam eles isolados ou multissítios integrados. Essa prática é essencial para revitalizar áreas

urbanas degradadas, melhorar a qualidade de vida, conter a expansão urbana desordenada e otimizar a infraestrutura existente, gerando benefícios econômicos, ambientais e sociais (Abrams et al., 2024; Goosen & Fitchett, 2019; Interstate Technology and Regulatory Council [ITRC], 2017; Loures & Vaz, 2018; Wei et al., 2025). Assim, o planejamento estratégico de grandes cidades deve incluir abordagens integradas e abrangentes, capazes de lidar com a complexidade dos multissítios e articular as dimensões técnica, institucional e legal de forma eficaz.

Considerar desde o início modelos conceituais voltados para áreas integradas em configurações multissítios fortalece a recuperação e a reutilização de espaços urbanos, ajudando a conter a expansão da fronteira urbana, mitigar processos de gentrificação e reduzir impactos climáticos e ambientais (Chetri et al., 2025; Lehigh et al., 2020; Siqueira-Gay et al., 2019). Ao transformar terrenos contaminados em áreas habitáveis e produtivas, diminui-se o risco à saúde pública e promove-se maior coesão social, contribuindo para cidades mais inclusivas e sustentáveis (Hou et al., 2023). Nesse contexto, este artigo tem como objetivo ressaltar a importância de adotar modelos conceituais multissítios na gestão de áreas contaminadas e apresentar a região do Arco Jurubatuba como um estudo de caso icônico, que exemplifica esses desafios e potencialidades. Entre os benefícios dessa estratégia de gestão, destacam-se: melhor alocação de investimentos, compartilhamento de experiências e soluções, planejamento urbano sustentável, busca de convergência entre *stakeholders*, criação de normatização para ações de investigação e mitigação de impactos, além da comunicação com a sociedade (Eklund et al., 2024; Sillos et al., 2025).

2 MODELO CONCEITUAL DE ÁREAS CONTAMINADAS

2.1 Definição

Modelos conceituais são instrumentos fundamentais no gerenciamento de passivos ambientais e áreas contaminadas, pois representam de forma dinâmica as hipóteses sobre a evolução de contaminantes, suas causas prováveis, mudanças nos receptores e as principais incertezas associadas (Hart et al., 2021; ITRC, 2017). Geralmente apresentados como relatórios técnicos acompanhados de diagramas interativos, esses modelos são essenciais para compreender, remediar e monitorar, a longo prazo, locais contaminados complexos, além de facilitar a comunicação entre técnicos, gestores e a sociedade.

De acordo com diretrizes internacionais, como as da USEPA, a construção do modelo conceitual (MC) é uma etapa central do gerenciamento ambiental, pois permite lidar com incertezas, incluindo aquelas relacionadas às mudanças climáticas, e serve de base para o desenvolvimento de modelos numéricos complementares, fortalecendo decisões de remediação, planejamento do uso do solo e gestão sustentável de riscos hidrogeológicos em áreas degradadas (Cramer et al., 2025; Hart et al., 2021).

Os modelos conceituais representam práticas recomendadas pelos guias estadunidenses da USEPA (2024) e são parte fundamental dos processos de gerenciamento de áreas contaminadas, segundo a Decisão de Diretoria (DD) 38/2017/C de fevereiro de 2017 (CETESB, 2017). Segundo a DD-38, os modelos conceituais são definidos enquanto:

Relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao transporte das substâncias químicas de interesse na área investigada, desde as fontes potenciais, primárias e secundárias de contaminação, até os potenciais ou efetivos receptores. Esse relatório deve conter a identificação das substâncias químicas de interesse, das fontes de contaminação, dos mecanismos de liberação, dos meios de transporte, dos receptores e das vias de ingresso das substâncias (CETESB, 2017, p. 12).

Atualmente, no cenário paulistano, a construção dos modelos conceituais deve considerar ao menos quatro estágios diferentes, associados a cada etapa do processo de diagnóstico do gerenciamento das áreas contaminadas. O MC1 corresponde ao modelo conceitual da avaliação preliminar com a proposta de representar amplamente as hipóteses de liberação de substâncias a partir da fonte de contaminação das áreas com potencial de contaminação (AP), enquanto o MC2, elaborado na investigação confirmatória, tem como objetivo revisar as hipóteses de liberação das substâncias químicas de interesse (SQI) a partir de fontes primárias para o meio, bem como classificar a fonte de contaminação (externa, difusa, natural etc.) e identificar os bens a serem protegidos. Já durante a investigação detalhada, a proposta do MC3, além de descrever o meio físico e as concentrações de SQI nos seus diferentes componentes, é delimitar nos planos horizontal e vertical as dimensões das plumas de contaminantes, quantificando massas e caracterizando o transporte e as vias de exposição aos seres humanos. Por fim, o MC4, elaborado

na etapa de avaliação do risco toxicológico, tem como objetivo determinar os valores calculados de risco a todos os expostos, considerando seres humanos e bens a proteger (corpos d'água, fauna e flora) e estabelecendo as necessidades de remediação a fim de controlar o risco toxicológico ao ecossistema e à saúde humana. A Figura 1, adaptada de CETESB (2017), mostra o fluxo que se tem empregado no uso de MCs e sua dinâmica no processo de investigação de passivos ambientais no Brasil.

O uso de modelos conceituais está entre as ferramentas mais importantes no gerenciamento de áreas contaminadas em todo o mundo, sendo fundamental para a compreensão da complexidade de interação entre meio físico e biológico, com o cenário de contaminação existente, tanto em tempo presente como futuro. Além disso, a conexão

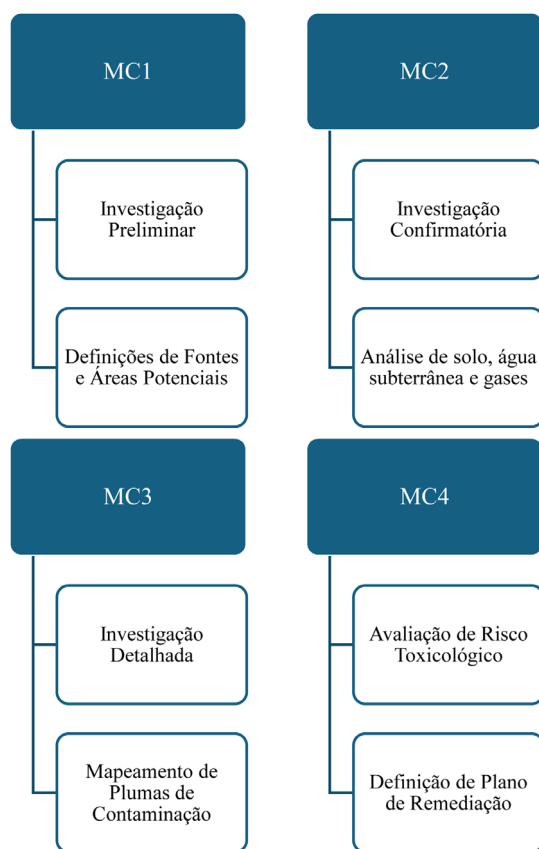


FIGURA 1 – Diagrama do fluxo de elaboração dos modelos conceituais ao longo do processo de gerenciamento de áreas contaminadas. Fonte: CETESB (2017).

FIGURE 1 – Diagram of conceptual model development throughout the contaminated site management process. Source: CETESB (2017).

possível entre os impactos de contaminantes, o cenário de exposição e os receptores materializa a captação de informação desenvolvida sobre as fontes de contaminação, sua toxicidade, transporte, dispersão e intensidade de exposição de receptores, alertando gestores sobre a procura de dados para suporte na tomada de decisão (Butt et al., 2020).

Em 2024, a CETESB publicou sua Decisão de Diretoria 056/2024/E (CETESB, 2024b) com um novo procedimento para solicitação de pareceres acerca do gerenciamento de áreas contaminadas, agrupando em blocos os procedimentos de investigação ou mitigação de sítios. Nesse documento, um fato relevante é que o agente de controle propõe organizar a gestão e sua interferência seguindo a lógica de etapas determinísticas de ações administrativas de sua responsabilidade (e.g. encerramento de caso, notificação a outras agências como de saúde pública ou gestão de águas) ou dos agentes envolvidos no processo (consultores ou responsáveis por áreas contaminadas). Desta forma, este documento estabelece um menor número de etapas em que a agência se manifestará sem estabelecer prazos para tal.

Convém destacar que, historicamente, as avaliações de *brownfields*, não apenas no Brasil, buscaram uma leitura individualizada (área a área), qual seja, industrial, comercial, aterro, posto de serviços, entre outros, sem buscar uma avaliação regionalizada dos riscos derivados de múltiplos sítios contaminados interligados (ou áreas complexas), em especial do risco sinérgico desses passivos ambientais e suas externalidades potencializadas. Também, conforme apresentado em Li et al. (2021), o prazo de remediação foi identificado como um fator crucial na sustentabilidade e na tomada de decisão na seleção de projetos de remediação, especialmente em mercados em rápido desenvolvimento como a China, onde a importância da celeridade de conversão de uso dos *brownfields* é significativa.

2.2 Modelo conceitual de áreas complexas

No vocabulário técnico da área de gestão de passivos ambientais (GPA) e de gerenciamento de áreas contaminadas (GAC), existem termos para classificar as áreas conforme características particulares, como área contaminada, área crítica e área complexa, cuja adoção vem crescendo nas discussões hidrogeológicas (CETESB, 2017; De Sousa et al, 2023; ITRC, 2017; Hart et. al, 2021, 2023; National Research Council [NRC], 2013).

Enquanto área contaminada se refere a um local com confirmação de substâncias nocivas no solo e no aquífero, o termo “área crítica” ou “área contaminada crítica” diz respeito a um local com risco iminente para a vida ou para a saúde humana (CETESB, 2017). Por outro lado, as áreas complexas/multissítios representam locais, propriedades e até regiões que apresentam grandes desafios técnicos (e não-técnicos), em que as abordagens clássicas não são suficientes para resolução, havendo sobreposição de responsabilidades, como no caso de plumas de contaminantes combinadas (De Sousa et al., 2023; Hart et al., 2023; Price et al., 2017). O Conselho Regulatório Interestadual dos Estados Unidos (ITRC, sigla em inglês) acrescenta à definição de área complexa a questão temporal da remediação local, abordando como “um local em remediação ambiental que, devido a desafios técnicos e não-técnicos, provavelmente não será restaurado dentro de um prazo razoável” (ITRC, 2017).

Hart et al. (2023) utilizam, para além das recomendações de abordagem em áreas complexas descritas por De Sousa et al. (2023), ITRC (2017), NRC (2013) e Price et al. (2017), o gerenciamento adaptativo, a partir do qual a abordagem holística para com a região analisada permite a revisão em detalhes significativos do modelo conceitual temporal da área.

O planejamento para que se viabilize a atualização e refinamento de informações e modelos conceituais possibilitaria alcançar um nível de confiança considerável a respeito dos riscos e incertezas, em uma área complexa contaminada (Kresic & Mikszewski, 2013). Contudo, mesmo com os instrumentos e metodologias do GAC, não obstante ocorrem casos em que os objetivos da remediação ou recuperação não são atingidos, em decorrência de desafios intrínsecos à área, que podem ser de natureza técnica ou não-técnica. A USEPA (2023) apresenta um guia de soluções de remediação, destacando a importância de modelos conceituais para sua escolha.

No início do século atual, foram identificados 126.000 casos inacabados de áreas contaminadas apenas nos EUA, dentre os quais cerca de 12.000 demonstraram a necessidade de estudos de aprofundamento e prazos mais extensos que o comum para a remediação efetiva, sendo, portanto, reconhecidas enquanto áreas complexas (NRC, 2013). Muitas das atividades estão relacionadas a polos industriais, logísticos, áreas de mineração, entre outros, que, por introduzirem contaminantes tóxicos no meio ambiente, exigem a adoção de estraté-

gias integradas de remediação e controle ambiental (Dehkordi et al., 2024). A Tabela 1 apresenta os desafios técnicos identificados em áreas complexas como estas, segundo relatório do ITRC de 2017.

De forma geral, os desafios técnicos associados à complexidade de características intrínsecas à área contaminada agregam dificuldades para a abordagem da gestão, como seu tamanho, o volume do material que constitui fonte de contaminação, os caminhos preferenciais de fluxo associados à geologia, as condições geoquímicas do meio, as características dos contaminantes, a litologia, a heterogeneidade do solo, a dinâmica hidráulica dos aquíferos e o cronograma operacional (CETESB/SEMIL, 2025b, Sillos et al., 2019). Entretanto, os desafios não-técnicos, que englobam questões não menos importantes, como os objetivos e expectativas para a área, a titularidade da área, o financiamento para os projetos, as legislações e regulamentações, o tempo de extensão da remediação, além de outras questões, somam-se aos desafios técnicos para a complexidade da gestão proposta (Tabela 1).

TABELA 1 – Principais desafios técnicos identificados em áreas complexas. Fonte: ITRC (2017).

TABLE 1 – Main technical challenges identified in complex areas. Source: ITRC (2017).

<i>Desafios técnicos</i>	<i>Definições</i>
<i>Condições Geológicas</i>	Heterogeneidade geológica / caminhos preferenciais
	Falhas / fraturas / geologia cárstica
	Meio de baixa permeabilidade
<i>Condições Hidrogeológicas</i>	Velocidades extremas ou variáveis da água subterrânea
	Nível d'água flutuante / Contaminação profunda em água subterrânea
	Interação entre água superficial e subterrânea e sedimento não impactado
<i>Condições Geoquímicas</i>	Geoquímica extrema (condições pH / redox extremas)
	Temperatura extrema em água subterrânea
	Atenuação natural em SQI de maior mobilidade e toxicidade
<i>Condições dos Contaminantes</i>	Presença de LNAPL ou DNAPL
	Contaminantes de difícil manejo / Contaminantes emergentes
	Múltiplos contaminantes em elevadas concentrações
<i>Escala do Sítio</i>	Lugar e extensão da contaminação
	Número, tipo e proximidade dos receptores
	Profundidade da contaminação / Plumagens extensas ou misturadas

O ITRC (2017) elaborou um guia para auxiliar na identificação de casos que sejam passíveis de serem classificados como Área Complexa, no qual são definidos os desafios técnicos e não-técnicos que podem ocorrer em uma área. Dentre os tópicos abordados pelo guia, os objetivos para o sítio, o gerenciamento de mudanças que podem ocorrer em longos períodos, a sobreposição de responsabilidades regulatórias, os controles institucionais, as mudanças no uso do terreno e as questões de financiamento são destacados no fluxograma apresentado na Figura 2.

Barbosa et al. (2017) destacam que o gerenciamento tradicional, aplicado aos sítios isolados e focado em cada terreno individualmente, mostra-se ineficaz para multissítios, exigindo abordagens integradas e ferramentas de gestão de dados ambientais. Estas ferramentas, por sua vez, necessitam ser aplicadas considerando a unidade da integração de focos de um contexto multissítios, uma vez que diminuem o retrabalho da gestão e das ações aplicadas para com o objetivo final – mitigar os impactos da contaminação na qualidade de vida e na saúde humana. Portanto, a revitalização de áreas contaminadas depende de políticas de cooperação entre órgãos públicos, setor privado e sociedade civil, visando à reabilitação e ao uso seguro dessas áreas (Freitas, 2017). Uma vez que multissítios frequentemente impactam grandes populações urbanas, a ação gerencial pode envolver questões de saúde pública, como maior risco de doenças congênitas em populações afetadas pela contaminação de sistemas complexos como os multissítios (e.g. Santoro et al., 2017).

Liu et al. (2024) apresentam uma revisão de grande número de casos de remediação chineses em sítios complexos, trazendo a perspectiva da solução tecnológica integrada com ações *in-situ* e *ex-situ*, e demonstrando como essa alternativa oferece vários benefícios, entre eles, a redução de custos, a mitigação da pegada de carbono, a prevenção de despesas secundárias ao poder público (e.g. custos com sistema de saúde) e, por fim, a conversão de passivos em ativos ambientais para a comunidade impactada, fato que conferiria uma melhoria de reputação do papel do estado.

A gestão dessas áreas contaminadas é particularmente desafiadora para *stakeholders* e pode ser gravemente danosa para a população exposta a suas externalidades (Schlappa & Ferber, 2016). O caso do Arco Jurubatuba com sua tardia restrição à captação e ao consumo das águas subterrâneas contaminadas por SQI carcinogênicas (ano 2006)

<i>Objetivos do sítio</i>	<i>Gestão de mudanças de uso ao longo do tempo</i>	<i>Responsabilização regulatória</i>
Expectativas sociais Mudanças objetivos da área	Remediação faseada Novos usos futuros Manejo dos sítios Múltiplos proprietários	Cooperação poder público Mudanças na legislação Responsabilização financeira
Adoção de usos irregulares ao licenciamento	Perda de conhecimento institucional Rotatividade de pessoas e novos litígios	Áreas órfãs Contaminantes emergentes Novos guias e padrões



<i>Controles institucionais</i>	<i>Mudanças de uso do sítio</i>	<i>Financeiro</i>
Rastrear e manusear os controles Estabelecer comunicação e estruturação de ações	Gestão da mudança de uso Controle do risco de solo e água	Fomentação de fundos para recuperação de <i>Brownfields</i> Políticas de fomento
Gestão das partes envolvidas e planejamento de longo prazo Controle de riscos como captações irregulares e conflitos socioeconômicos	Abordagem holística, com diversos interessados Avaliação do risco de sítios em mudança de uso	Estabelecer critérios de priorização a cenários de risco a populações vulneráveis

FIGURA 2 – Principais fatores não-técnicos do Gerenciamento de Áreas Complexas. Adaptado de ITRC (2017).

FIGURE 2 – Main non-technical factors in Complex Site Management. Adapted from ITRC (2017).

reforça a distância entre a informação de um risco decorrente de um passivo ambiental e a pouca celeridade que o Estado tem na adoção de medidas de controle, a fim de evitar-se o risco, ou mesmo perigo, decorrente dos passivos ambientais regionalizados (Sillos, 2006).

3 O CASO DO ARCO JURUBATUBA

No contexto brasileiro, um exemplo emblemático de passivos ambientais é o antigo distrito industrial de Jurubatuba, na cidade de São Paulo. Consiste em área complexa ou em configuração multissítio, onde décadas de atividades industriais pouco responsáveis para com os impactos ambientais e o meio, resultaram em uma contaminação regional do aquífero por solventes clorados, com múltiplas fontes e responsáveis legais (Figura 3). A complexidade do local demandou o desenvolvimento de sistemas integrados de informação, como o uso de Geoprocessamento (GIS), para consolidar dados e apoiar decisões de gestão ambiental, uma vez que existe sobreposição das plumas das atividades industriais locais e, portanto, dos responsáveis legais (Lima, 2018; Pino

et al., 2021). Destaca ainda Barbosa (2015) que há inúmeros desafios e lacunas de informações a se integrar no plano de gestão de risco ambiental relacionados aos passivos existentes, situação que indica a necessidade de investigações com os seguintes objetivos:

- Sanar-se a ausência de registros de informações pretéritas em metade dos empreendimentos;
- Avaliar se rios e córregos são zonas de descarga dos aquíferos de porosidade intergranular (sedimentos e saprólito);
- Caracterizar os principais locais de ocorrência de concentrações mais elevadas de solventes clorados; e
- Identificar a existência de concentrações elevadas em alguns poços de abastecimento próximos às áreas que manipularam solventes clorados no passado.

3.1 Aspectos sociais e históricos

Jurubatuba localiza-se no distrito de Santo Amaro, na zona sul da cidade de São Paulo (SP, Brasil), possuindo o histórico ocupacional que engloba registros de aldeias originárias do século

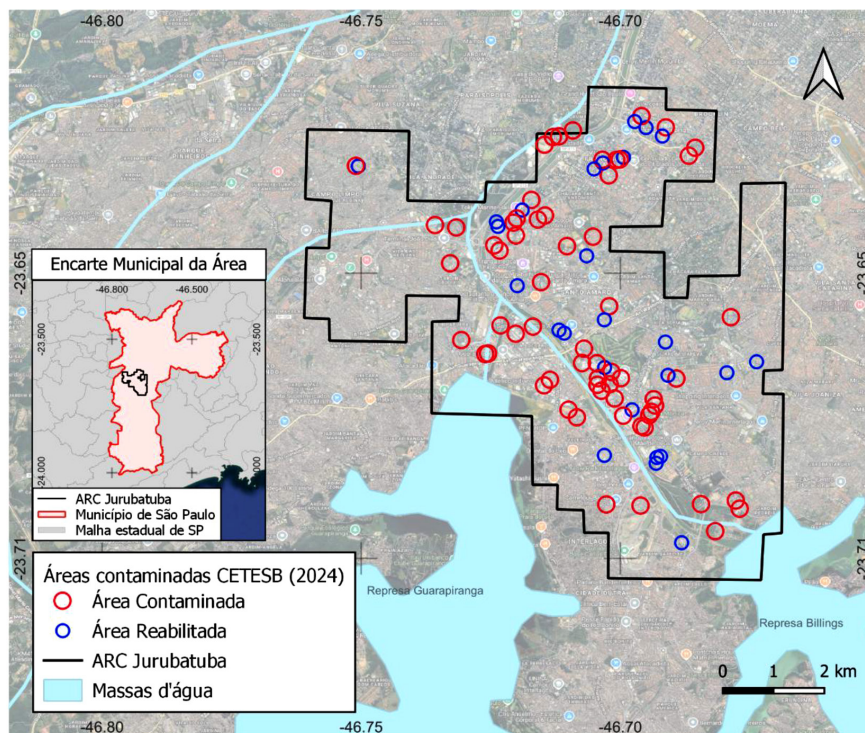


FIGURA 3 – Mapa de áreas contaminadas e recuperadas na Área de Restrição e Controle (ARC) Jurubatuba a partir da base de dados da CETESB (2024a).

FIGURE 3 – Map of contaminated and remediated areas in the Jurubatuba Restriction and Control Area (RCA) based on the CETESB (2024a) database.

XVI, passando por um intenso processo de industrialização e urbanização durante o século XIX, impulsionado pelas exigências do crescimento populacional e das dinâmicas socioeconômicas do país até os dias atuais, apresentando um enfoque em requalificação urbanística e a construção de moradias verticais (Cravo, 2021). Agregado ao nome da região Jurubatuba, o termo "arco" é utilizado para designar uma área que se desenvolve em torno de uma infraestrutura de transporte. Em São Paulo, esse conceito foi aplicado a diferentes projetos de intervenção urbana (PIUs) que buscam requalificar e adensar regiões ao longo de eixos de mobilidade, como o Arco Tietê e, no caso em questão, o Arco Jurubatuba (São Paulo, 2016).

Considerando o contexto histórico da região, foi delimitada a partir da Deliberação CBH-AT, nº 01, de 16 de fevereiro de 2011 (Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê [CBH-AT], 2011), rerratificada pela Deliberação CBH-AT, nº 139 de 15 de dezembro de 2021 (CBH-AT, 2021), complementada pela CRH nº 265, de 28 de abril de 2022 (Conselho Estadual de Recursos Hídricos [CRH], 2022), a Área de Restrição e Controle para

captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo (ARC - Jurubatuba) (Figura 4A). O projeto ARC - Jurubatuba configura uma intervenção estratégica voltada para a restrição e o controle do uso das águas subterrâneas na região do entorno do Canal do Jurubatuba. Em decorrência das condições de passivos ambientais locais, foram estabelecidas áreas de restrição classificadas em diferentes níveis - alta, média e baixa - com o objetivo de impedir a exploração descontrolada desses recursos hídricos e proteger a qualidade da água destinada ao abastecimento público e a usos urbanos. A deliberação fundamenta diretrizes específicas para o monitoramento, fiscalização e controle da perfuração e operação de poços, além da obrigatoriedade de realização de análises físico-químicas das águas. Como impacto primordial, o projeto promoveu a contenção da superexploração e agravamento da contaminação, assegurando a sustentabilidade hídrica da região e contribuindo para a proteção da saúde pública e do meio ambiente urbano, embora demandando constante atualização e aprimoramento das medidas frente à experiência operacional e aos desafios ambientais.

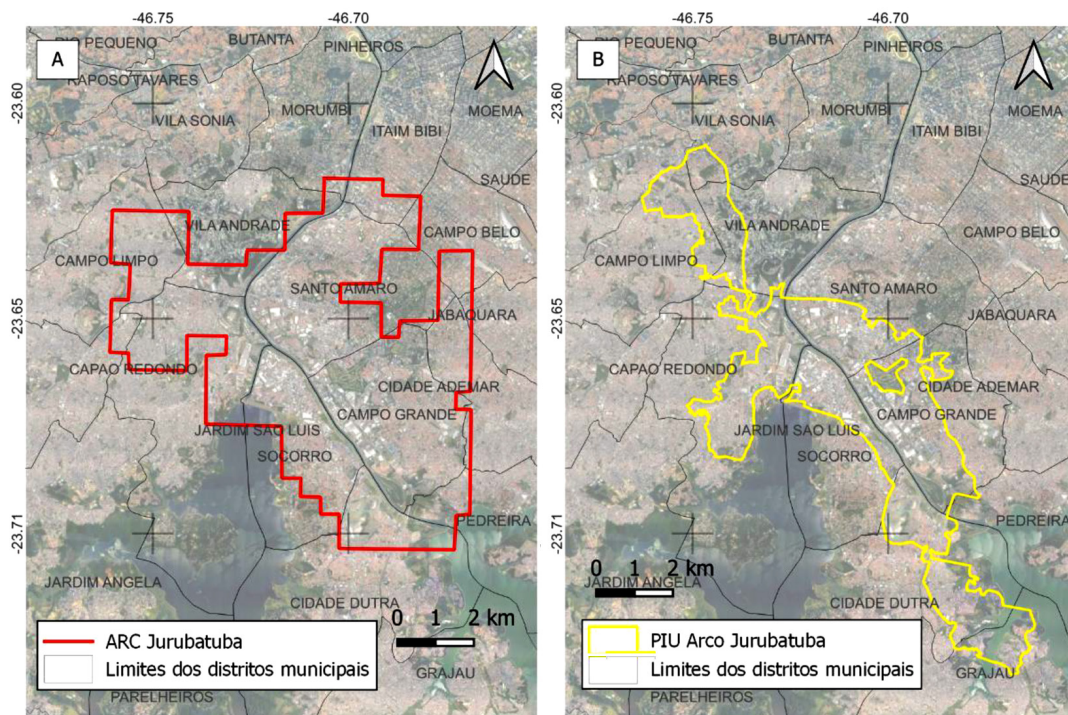


FIGURA 4 – Delimitações (A) da Área de Restrição e Controle para captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo (ARC - Jurubatuba); e (B) de ocorrência do Projeto de Intervenção Urbana do Arco Jurubatuba.

FIGURE 4 – Delimitations (A) of the Restriction and Control Area for groundwater capture and use in the municipality of São Paulo (ARC - Jurubatuba); and (B) of the occurrence of the Jurubatuba Urban Intervention Project.

Em 2023, a partir da Lei Nº 17.965, de 19 de junho de 2023 (São Paulo, 2023), complementada pela Lei Nº 18.178, de 25 de julho de 2024 (São Paulo, 2024), foi criado o Projeto de Intervenção Urbana (PIU) Arco Jurubatuba (Figura 4B), que possui em curso intenso processo de reurbanização (aproximadamente 5 mil unidades habitacionais entregues por ano), com processo de verticalização acelerada da região, sendo esta realizada por vezes sobre históricos *brownfields* existentes, e com isso efetivando riscos toxicológicos associados a contaminações ambientais existentes na região. A Figura 5 é uma representação artística do projeto em questão. Destaca-se que, na legislação apresentada, de seus 64 artigos, apenas um deles (artigo 49), de forma superficial, atribui apenas à Secretaria de Saúde Municipal monitorar a ocupação de áreas oriundas de processos de descontaminação do solo, ou seja, sem apontar em qualquer documento a preocupação com passivos ambientais oriundos de contaminação de solo, água subterrânea ou riscos de intrusão de vapores.

Face ao histórico, bem como ao cenário atual de uso da região, o Projeto do Arco Jurubatuba é uma iniciativa de requalificação urbana voltada para a revitalização e reestruturação de Jurubatuba, localizada na zona sul de São Paulo. Com um enfoque integrado, segundo a Prefeitura de São Paulo (São Paulo, 2023), o projeto busca transformar a área ao promover a integração entre moradia, trabalho, transporte e meio ambiente, visando à melhoria da qualidade de vida dos moradores e à dinamização da economia local. As perspectivas são positivas, ainda que se evidencie que os arranjos institucionais e os instrumentos selecionados para elaboração e futura implementação do PIU aumentam a complexidade do projeto, a fragmentação do processo e a superficialidade dos procedimentos de participação e legitimação da intervenção (Gueresi, 2024). Com a sua implementação, espera-se que Jurubatuba se torne um modelo de desenvolvimento sustentável, melhorando a qualidade de vida dos seus habitantes e promovendo um crescimento econômico inclusivo e ambientalmente responsável.



FIGURA 5 – Representação Conceitual do Projeto Urbanístico de Jurubatuba. Adaptado de São Paulo (2018).

FIGURE 5 – Conceptual Representation of the Jurubatuba Urban Project. Adapted from São Paulo (2018).

O censo realizado em 2022 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), verificou que o território do Arco Jurubatuba abriga um contingente aproximado de 150.000 habitantes (1,25% da população paulistana) em uma área bruta de 2.158 hectares (1,41% do município) dos quais 1.400 são área de lote, isto é, destinados à edificação. A taxa de crescimento populacional é de 1,2% ao ano (IBGE, 2022). Atualmente, segundo a Prefeitura de São Paulo (São Paulo, 2023), embora tenha demonstrado um declínio, a atividade industrial ainda representa importante papel de atuação na região, em especial a indústria química, seguida pela eletromecânica e têxtil, portanto, sendo uma zona de risco contínuo de surgimento de novos focos de passivos ambientais (o PIU visa, também, a reindustrializar a região).

Acerca da dinâmica da contaminação na ARC Jurubatuba, autores como Dias (2021) destacam a complexidade do problema na região, considerando sua evolução histórica, com alta densidade de poços tubulares profundos e que apresentam proximidade com áreas contaminadas e zonas de restrição do uso de água subterrânea (Figura 6). Ainda, na porção noroeste da área destacada na Figura 6, observa-se uma densidade incomum de poços de bombeamento, por conta de técnicas de remediação por barreira hidráulica,

outorgados e inclusos no banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), *apud* Dias (2021). A principal zona de restrições de captação de água, bem como sua integração com manancial local, é apresentada no retângulo vermelho central à área de estudo (Figura 6).

Considerando que os principais responsáveis legais na região em destaque da Figura 6 são indústrias automotivas, metalúrgicas, de bebidas e de embalagens plásticas, Dias (2021) reforça a possibilidade de que os poços profundos estejam a bombear água de plumas de contaminação. Entretanto, a sobreposição de áreas contaminadas na região de Jurubatuba não é 100% correspondente às zonas de restrição ao uso de água subterrânea, como é possível observar na Figura 7.

Os resultados de Dias (2021) permitiram a construção da seção geológica apresentada na Figura 7, identificando duas unidades hidroestratigráficas distintas: o Sistema Aquífero Cristalino (SAS) e o Sistema Aquífero Sedimentar (SAC). O SAC é o alvo de bombeamento de todos os poços, demonstrando que contaminantes como metais e solventes halogenados e aromáticos provenientes da atividade industrial local estão presentes no embasamento cristalino e geograficamente próximos dos poços tubulares.

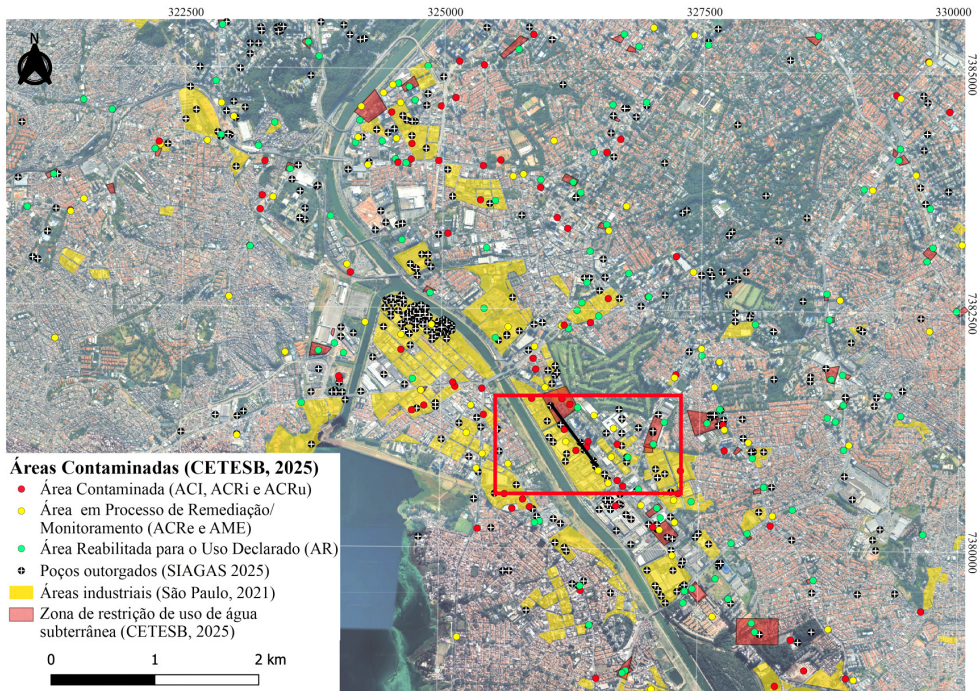


FIGURA 6 – Localização de poços tubulares e áreas contaminadas em regiões industriais na região de Jurubatuba (extrato da escala 1:50.000) e área de interesse destacada pelo retângulo vermelho e representada na Figura 7. Fonte: Dias (2021).

FIGURE 6 – Location of tubular wells and contaminated areas in industrial regions of Jurubatuba (original scale 1:50,000) and interest area highlighted by red rectangle and represented in Figure 7. Source: Dias (2021).

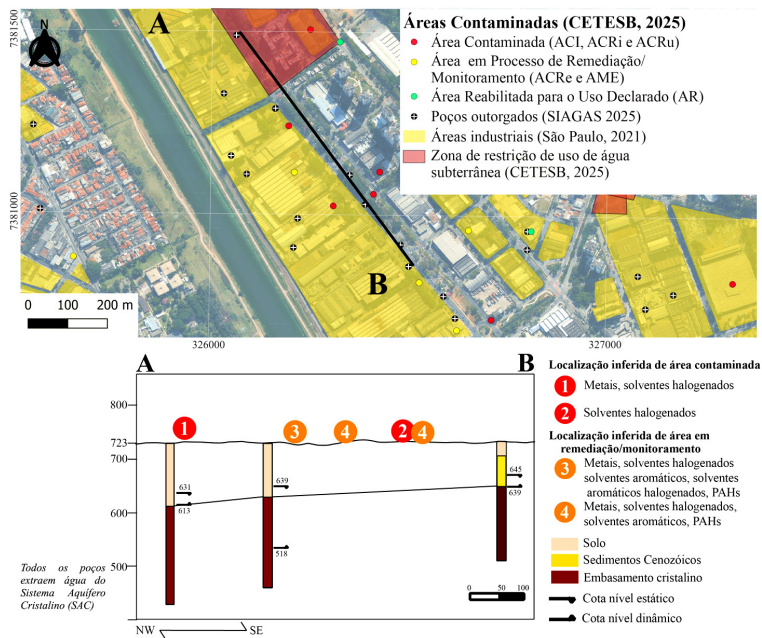


FIGURA 7 – Traçado da seção geológica elaborada sobre a região de Jurubatuba (extrato da escala de 1:5.000) e representação vertical dos poços tubulares em regiões contaminadas de Jurubatuba (escala de 1:20.000). Adaptado de Dias (2021).

FIGURE 7 – Drawing of the geological section over the Jurubatuba region (original scale 1:5,000) and vertical representation of tube wells in contaminated areas of Jurubatuba (scale 1:20,000). Adapted from Dias (2021).

3.2 Aspectos geográficos, geológicos e hidrogeológicos

A litoestratigrafia da região do Arco Jurubatuba, assim como grande parte da cidade de São Paulo, é composta pela associação de complexos ígneo-metamórficos pré-cambrianos, como embasamento de formações sedimentares cenozoicas (Figura 8). Sob a perspectiva geomorfológica, o embasamento cristalino ocorre na forma de morros, morrotes e serras, enquanto as camadas cenozoicas, como colinas e planícies aluvionares.

O embasamento cristalino pré-cambriano é composto por rochas com distintos graus de metamorfismo: xistos e paragneisses de condições mais brandas a médias do Complexo Embu, anfibolitos e quartzitos típicos do metamorfismo regional de médio grau do Complexo Itapeti e gnaisses bandados e migmatitos dos Complexos Gnáissico-Magmáticos do Terreno Embu de alto grau. Por fim, o embasamento cristalino con-

ta com a intrusão de granitos e granodioritos do Complexo Granítico em diferentes momentos tectônicos. Tal diversidade contribui para a complexidade geológica da região. Essas formações influenciam significativamente a topografia, a composição do solo e os recursos minerais disponíveis.

Sobre o embasamento cristalino assenta-se a Bacia Sedimentar de São Paulo (formações Resende, Tremembé, São Paulo e Itaquaquecetuba), sendo constituída por depósitos de sistema fluvial meandrante, litologicamente com conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos, caracterizando depósitos de canal, barra de pontal e planície de inundação, podendo alcançar 200 m de espessura (Campos et al., 2002). Complementarmente, os processos de intemperismo químico e físico afetam os sedimentos desta bacia, alterando suas características mineralógicas e físicas e, consequentemente, hidrogeológicas.

Os sedimentos quaternários são compostos por depósitos aluviais (areia, silte, argila e casca-

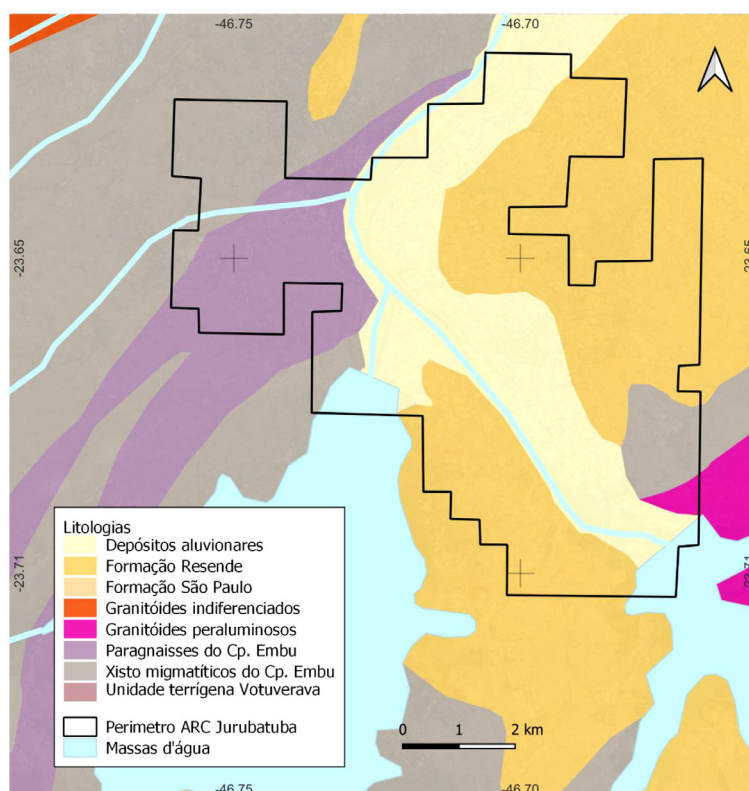


FIGURA 8 – Mapa Geológico de Escala Regional da Porção Sul do Município de São Paulo, Brasil. Adaptado de Perrotta et al. (2006).

FIGURE 8 – Regional Geological Map of the Southern Portion of the Municipality of São Paulo, Brazil. Adapted from Perrotta et al. (2006).

lhos), que ocorrem ao longo das várzeas dos rios e córregos atuais, destacando-se as planícies dos rios Tietê (que na região do Pari e Vila Maria chega a 14 km de largura), Pinheiros e Tamanduateí, intensamente remodeladas pela ação humana, por meio de retificações dos canais e aterramento das várzeas.

As características dos solos e aquíferos impactam a construção civil, a gestão de recursos hídricos e as estratégias de planejamento urbano. A presença de aquíferos fraturados e sedimentares oferece fontes de água subterrânea, enquanto a resistência das rochas cristalinas proporciona uma base sólida para a infraestrutura urbana.

Os aquíferos fraturados em São Paulo são formados principalmente por rochas cristalinas do embasamento pré-cambriano, por onde a água subterrânea circula através de fraturas, falhas e juntas. A capacidade de armazenamento de água nesses aquíferos é limitada pela baixa porosidade primária das rochas, sendo a porosidade secundária a predominante e dominada pela presença de fraturas. A produtividade de poços nestes aquíferos varia significativamente em função da densidade e conectividade das fraturas. Hirata e Ferreira (2001) apontam que a capacidade específica identificada no SAC pode apresentar média de 0,20 m³/h/m nas rochas grani-

toides, enquanto, em rochas metamórficas, a média é de 1,35 m³/h/m, sendo que em municípios como Cajamar, o valor máximo identificado pode chegar a 2,79 m³/h/m.

Os aquíferos porosos em São Paulo são representados principalmente pelo Aquífero São Paulo, composto pelas rochas sedimentares da Bacia de São Paulo (formações Resende, São Paulo, Tremembé e Itaquaquetuba), e pelas coberturas aluvionares e coluvionares mais recentes. O Aquífero São Paulo tem uma capacidade específica média de 0,48 m³/h/m, representando um pouco mais da metade da capacidade do Aquífero Resende – 0,91 m³/h/m, também componente do SAS (Hirata & Ferreira, 2001). Este aquífero é uma importante fonte para o abastecimento de água da cidade, especialmente nas áreas onde a exploração de água subterrânea é intensiva.

Os aquíferos aluviais possuem alta capacidade de armazenamento e transmissão de água, constituindo importantes fontes de água subterrânea para abastecimento urbano e agrícola, sendo geralmente encontrados em áreas mais superficiais e próximas a cursos d'água estando, portanto, mais suscetíveis à contaminação antrópica. A Figura 9 apresenta a hidrogeologia local.

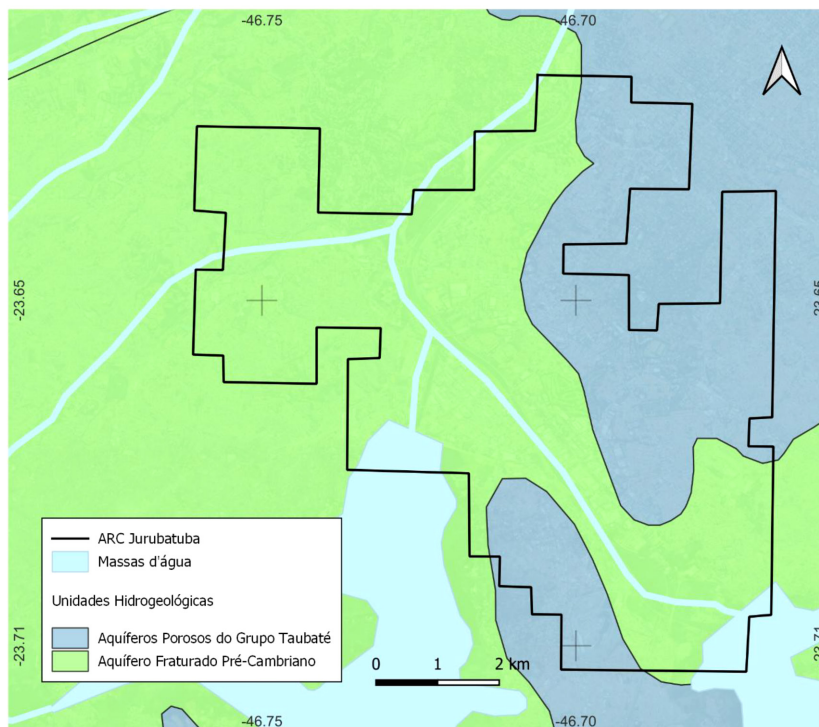


FIGURA 9 – Hidrogeologia regional da área do Arco Jurubatuba. Fonte: DAEE/IG/IPT/CPRM (2005).

FIGURE 9 – Regional hydrogeology of the Arco Jurubatuba area. Source: DAEE/IG/IPT/CPRM (2005).

3.3 Risco toxicológico no uso da água subterrânea

Jurubatuba possui diversas áreas contaminadas devido ao histórico industrial da região. A CETESB identifica, monitora e impõe restrições nessas áreas para proteger a saúde pública e o meio ambiente. A região de restrição e controle de captação e uso de águas subterrâneas, conforme estabelecido pela Deliberação CRH nº 132, de 19/04/2011, que homologa a Deliberação CBH-AT nº 01, de 16/02/2011, visa a proteger os recursos hídricos subterrâneos da sobre-exploração e da contaminação (CRH, 2011). Essa deliberação foi criada em resposta à necessidade crescente de regulamentar e gerenciar o uso das águas subterrâneas, garantindo sua sustentabilidade para as futuras gerações.

Esta medida visa não apenas a proteger os aquíferos, mas também a garantir que o uso da água subterrânea seja sustentável e equitativo.

A implementação das deliberações envolveu a identificação e a demarcação das áreas de restrição, a regulamentação das outorgas de captação e o monitoramento contínuo dos níveis e da qualidade da água subterrânea. As autoridades ambientais e os órgãos de gestão de recursos hídricos trabalharam em conjunto para assegurar que as medidas fossem eficazes e cumprissem os objetivos estabelecidos.

O inventário de áreas contaminadas identificou uma área contaminada crítica com 12 empresas envolvidas na região, onde o risco toxicológico em solo e das águas subterrâneas é significativo (CETESB, 2024a). Há vários casos notáveis de contaminação em Jurubatuba, onde foram encontrados elevados níveis de contaminação por metais pesados e solventes orgânicos. A contaminação nesta área afetou o solo e a água subterrânea, representando riscos diretos à saúde dos trabalhadores e residentes próximos (São Paulo, 2020). Atualmente, o perímetro de inviabilização de captação de água na região está restrito a algumas áreas de Jurubatuba em que se tem monitoramento de poços profundos contaminados por solventes clorados, tendo sido revogadas todas as outorgas de captação de água subterrânea.

Dada a gravidade da situação, entes públicos, entre eles a Secretaria de Meio Ambiente, o Ministério Público e a Universidade de São Paulo, desenvolveram estudos apresentados em L'Apicciarella et al. (2005, 2009), em que foram delimitadas áreas de restrição e controle de uso de água subterrânea na região de Jurubatuba. Este fato deveu-se, em

especial, à contaminação existente por compostos organoclorados e ao grande número de captações de água subterrânea existentes. Classificaram-se as frações contaminadas como áreas de alta, média e baixa restrição devido à proximidade com sítios sabidamente contaminados por DNPL (solventes organoclorados mais densos que água).

1. *Alta restrição*: regiões de maior densidade de Atividades com Elevado Potencial de Contaminação (AEPC), presença de poços com detecção de compostos organoclorados e áreas declaradas contaminadas com esses compostos.
2. *Média restrição*: áreas definidas para proteger as regiões adjacentes às células de alta restrição, considerando o modelo conceitual de fluxo de água subterrânea.
3. *Baixa restrição*: densidade intermediária de AEPC e suas células vizinhas que também necessitam de proteção (L'Apicciarella et al., 2005, 2009).

A Figura 10 mostra a ocorrência das áreas e as respectivas classificações das restrições.

3.4 Controle e risco toxicológico de Intrusão de Vapores

Muitos passivos ambientais apresentam contaminação por SQI voláteis, como hidrocarbonetos derivados do petróleo, solventes clorados, mercúrio, metano e radônio, os quais podem representar um potencial risco para intrusão de vapor (IV) (Ma et al., 2020; Zhang et al., 2025). De acordo com USEPA (2015b), intrusão de vapor é o termo geral aplicado à migração, por difusão, da fase gasosa de compostos orgânicos voláteis (COV) de uma fonte subterrânea através da zona não saturada. Em muitas situações, não há nenhum odor químico forte associado ao contaminante. Além disso, a dinâmica de uma pluma de contaminante pode ser de difícil previsão e seu comportamento pode variar no tempo e no espaço (O'Leary, 2025). A IV é considerada na avaliação de risco como a via de exposição humana mais importante em locais afetados por COV, uma vez que apresenta, em geral, o maior potencial para resultar em exposição humana real (Ma et al., 2020).

A IV é um tema relevante para a revitalização de *brownfields* onde compostos voláteis residuais no solo e nas águas subterrâneas podem permanecer não detectados, atuando como fonte de fases gasosas potencialmente contaminantes, cujo acúmulo pode atingir níveis inaceitáveis (Lonati

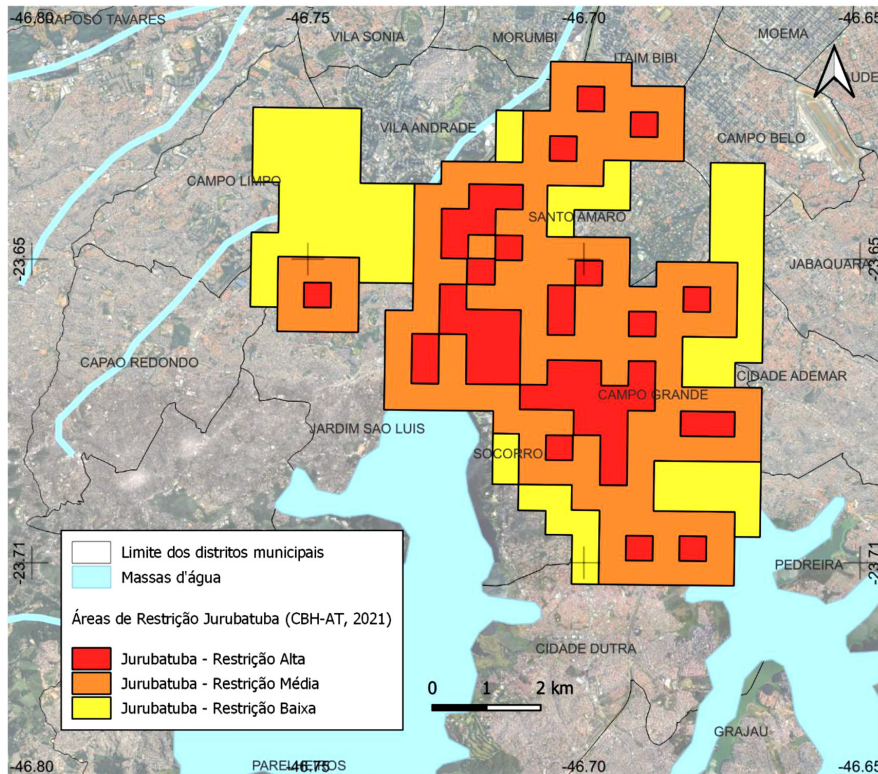


FIGURA 10 – Áreas de restrições ao uso de água subterrânea. Fonte: CBH-AT (2021).

FIGURE 10 – Areas with restrictions on the use of groundwater. Source: CBH-AT (2021).

et al., 2019). Segundo Hou e O'Connor (2020a, b), o setor de remediação ambiental evoluiu tecnicamente e se aprimorou de forma sustentável (*green remediation*) ao longo das últimas décadas, mas sem a perspectiva de “remoção total” dos contaminantes em função dos grandes impactos sociais e econômicos gerados. A IV é considerada o principal problema ambiental que o setor de incorporação imobiliária enfrenta em centros urbanos (Green, 2018). Geralmente, solos de zonas urbanas são física, química e biologicamente mais heterogêneos em relação a solos de origem natural, exigindo técnicas exclusivas de manejo. Além de locais de acúmulo subaéreo de gases, nos quais se concentram a maior parte dos estudos realizados sobre IV, espaços urbanos também apresentam estruturas subterrâneas (e.g. garagens subterrâneas, estações de metrô e túneis) frequentemente localizadas nas proximidades de sítios industriais desativados ou em atividade (Ma et al., 2020).

Segundo USEPA (2015a), o modelo conceitual padrão para IV considera os seguintes aspectos:

- i. Partição do contaminante presente no solo ou na água subterrânea para a fase gasosa;
- ii. Difusão do vapor através da zona vadosa da sua área de origem em direção às imediações das construções;
- iii. Advecção e/ou difusão do vapor através da fundação da construção.

Este modelo conceitual permite correlacionar o fenômeno da IV em sítios onde há plumas de COV presentes nas águas subterrâneas ou no solo. Entretanto, o modelo conceitual deve incorporar características físico-químicas locais que podem exercer controle sobre a migração e a degradação dos contaminantes. A investigação do meio físico é a primeira etapa em uma avaliação de IV, uma vez que as informações específicas dos sítios (e.g. tipo de contaminante, concentrações, vias preferenciais, distâncias dos receptores e presença de barreiras) podem determinar se a IV pode ocorrer dentro ou fora da área fonte (Baker et al., 2016; Wisconsin Department of Natural Resources, 2018). McHugh et al. (2017) relataram a ausência de IV em locais com altas concentrações de COV nas águas sub-

terrâneas. Nestes sítios, a presença de barreiras à difusão do vapor impediu sua migração para o interior das construções. Lentes de água subterrânea limpa e camadas de material fino saturado (silte e argila) sobre a pluma de COV, biodegradação na zona não saturada, fundações construídas com materiais impermeáveis e pressão diferencial positiva no interior das construções são alguns exemplos de barreiras à IV. Coloca-se, contudo, a questão relativa às áreas adjacentes aos *brownfields*: o que se pode antecipar quanto ao seu comportamento ambiental e à propagação dos contaminantes? Quando existem dezenas de áreas contaminadas concentradas em uma mesma região, torna-se plausível o risco de migração de gases para zonas de uso público – como escolas, espaços comerciais, praças ou teatros –, o que exige uma avaliação integrada do risco e das medidas de mitigação associadas.

A Figura 11 apresenta o modelo conceitual de um possível cenário de IV, como o existente na região de estudo.

O caso de Jurubatuba, classificada como uma área complexa, com múltiplas fontes de contaminantes, com plumas que podem combinar-se, provenientes de distintas origens e SQI,

exige uma avaliação de risco toxicológico para IV, levando em conta seu perfil cumulativo que demanda cuidadosa investigação para compreender-se sua extensão e gravidade. Dado que a região possui geologia heterogênea, esta pode impedir ou canalizar a migração de vapor de forma variada, complicando a avaliação e exigindo modelagem especializada. Corredores de serviços públicos subterrâneos, esgotos ou túneis subterrâneos podem atuar como conduítes para a migração de vapor, permitindo que a fase volátil se desloque por longas distâncias e invada edifícios que não estejam diretamente sobre a fonte de contaminação.

Além disso, mudanças sazonais da pressão barométrica e dos níveis das águas subterrâneas, com oscilações agravadas pelas mudanças climáticas, podem fazer com que as concentrações de vapor flutuem significativamente ao longo do tempo, fato que demanda *expertise* técnica no processo de diagnóstico e amostragem da área, para que se compreenda toda a gama de exposição e risco toxicológico potencial existente. Nesse sentido, Jurubatuba é um caso icônico de desafio aos gestores para sua adequada gestão e controle de perigos e riscos ambientais.

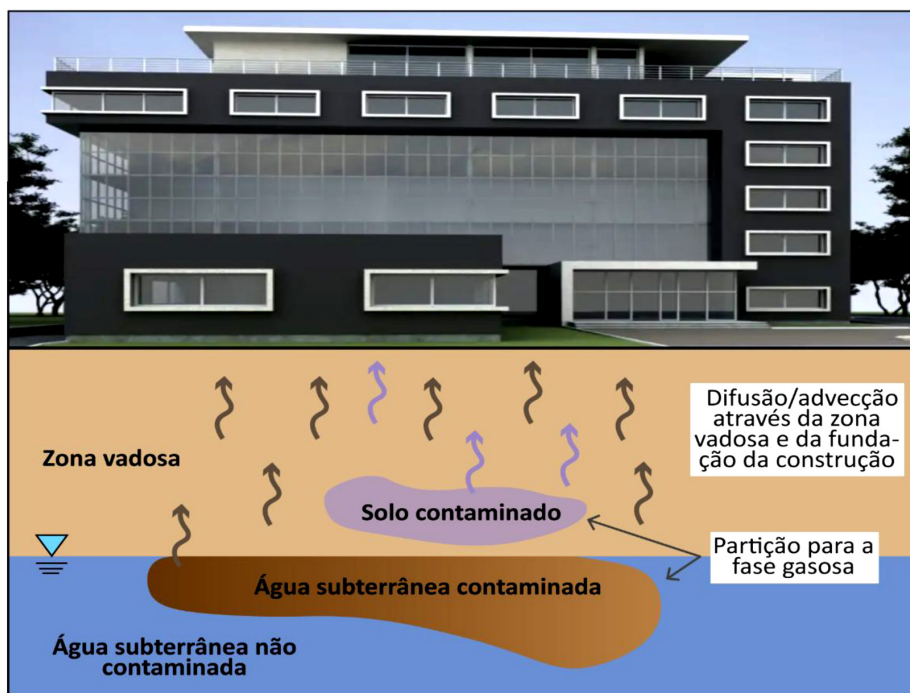


FIGURA 11 – Modelo conceitual padrão para intrusão de vapor. Fonte: Sillos (2023).

FIGURE 11 – Standard conceptual model for vapor intrusion. Source: Sillos (2023).

3.5 Avaliação de risco toxicológico com foco na IV

Existem diversas diretrizes técnicas que norteiam o gerenciamento de áreas com intrusão de vapores (Eklund et al., 2024; O’Leary, 2025; New Jersey Department of Environmental Protection [NJDEP], 2018). Alguns critérios de avaliação, como distância da área fonte da contaminação, concentração do contaminante volatilizado, fatores de atenuação e medidas de mitigação, variam de forma significativa de acordo com a legislação do estado ou país onde a norma técnica foi elaborada (Eklund et al., 2018).

A USEPA publicou, em 2015, dois protocolos atualizados (USEPA 2015a, 2015b), em que a problemática dos COV é tratada separadamente em função do potencial do contaminante para geração de IV. Neles, os vapores de COV clorados (cloreto de vinila e percloroetileno) são considerados mais resistentes à biodegradação na zona vadosa, enquanto os vapores de hidrocarbonetos derivados do petróleo (benzeno e xilenos) são mais facilmente atenuados a curtas distâncias quando há oxigênio suficiente na atmosfera da zona não saturada.

Durante a etapa de avaliação inicial do sítio, a abordagem é considerada conservativa (McHugh et al., 2017). Contudo, em áreas onde deseja-se detalhar a investigação, o plano de trabalho recomendado compreende uma série de ações de caráter intensivo que inclui amostragens de água subterrânea e de vapores ao longo do tempo, tanto no

subsolo quanto no ambiente interno. Os componentes principais que devem integrar um modelo conceitual de estudos de risco em etapa de investigação (USEPA, 2015a) encontram-se sumarizados na Tabela 2.

A quantificação dos riscos associados à IV pode ser uma tarefa difícil, em função da complexidade que envolve a devida caracterização de variáveis como caminhos preferenciais de migração de vapores, composição do ar em ambientes internos e métodos adequados de amostragem que representem de forma satisfatória a dinâmica das concentrações dos contaminantes (Kram et al., 2020).

As recomendações da USEPA para decisões relacionadas ao risco baseiam-se nas estimativas, em condições atuais e futuras, da exposição máxima razoável (EMR), definida como a maior exposição esperada para ocorrer em um determinado ambiente. Conceitualmente, ela é estimada como a porção acima do percentil 90 e abaixo do percentil 98 da distribuição de exposição (USEPA, 2015a). Em 2014, a USEPA publicou o *Vapor Intrusion Screening Level (VISL) Calculator User’s Guide* (USEPA, 2014), que fornece descrições, equações e parâmetros de exposição utilizados nos cálculos de concentração de vapores do ar ambiente a partir das concentrações dos gases presentes no solo e na água subterrânea, bem como a quantificação dos riscos baseados na EMR a longo prazo.

A calculadora de VISL é capaz de determinar se a via de IV tem o potencial para representar

TABELA 2 – Modelo Conceitual de risco de IV. Fonte: USEPA (2015a).

TABLE 2 – Conceptual model of vapor intrusion risk. Source: USEPA (2015a).

<i>Escopo mínimo recomendado</i>
• Inventário de substâncias químicas de interesse na região de estudo; • Áreas críticas e <i>brownfields</i> a considerar; • Incidentes prévios e informações sobre gases e odores no histórico da região; • Resumo do sítio investigado com base no entendimento atual das condições locais; • Mapa(s), em escala, ilustrando a extensão conhecida da contaminação do subsolo com zonas de referência prontamente identificáveis (e.g. ruas e edifícios); • Definições de localização e metodologia amostral (meios, frequência e padrões analíticos); • Análise da criticidade dos métodos a avaliar (se análise contínua, ativa, passiva, em campo ou em laboratório) a fim de avaliar-se flutuações de concentração ao longo do período monitorizado; • Determinação de áreas sensíveis a intrusão de vapores, bem como população exposta; • Plano de garantia de qualidade do projeto; • Plano de segurança; • Treinamento de equipe para a adequada caracterização de condições ambientais e interpretação de dados de campo; • Protocolos de amostragem recomendados, promovendo saúde e segurança ocupacional.

um nível inaceitável de risco para a saúde humana por meio de estimativas baseadas em critérios de volatilidade e toxicidade dos compostos químicos. A ferramenta fornece a listagem de produtos químicos voláteis conhecidos por representar risco potencial de câncer por meio da via de exposição respiratória, bem como as concentrações limite recomendadas em água subterrânea, vapores no subsolo e em ar ambiente para diferentes cenários de exposição residencial ou comercial (USEPA, 2014). Sillos et al. (2014, 2015, 2019), em estudos apresentados nos congressos de Battelle, apontaram a sensibilidade das avaliações de campo para IV, quando comparada ao modelo clássico de risco, em especial para substâncias químicas como PCE e seus derivados. Os cenários industriais contaminados por solventes clorados são de difícil diagnóstico, além de exigirem a contínua extração de gases por períodos prolongados, a fim de se mitigar os impactos nos receptores locais. Os componentes principais que devem integrar uma etapa de investigação detalhada para sítios com intrusão de vapores (USEPA, 2015a) encontram-se sumarizados na Tabela 3.

3.6 Intrusão de vapores e mudanças climáticas

As mudanças climáticas exacerbam os riscos de intrusão de vapores (IV) ao aumentar a variabilidade temporal nas concentrações de contaminantes no ar interno devido a fatores meteorológicos como pressão barométrica, velocidade dos ventos, temperatura e umidade do solo, fatores estes que influenciam o movimento dos vapores (Laemmel et al., 2019).

Eklund (2024) mostra que a maior variabilidade impulsionada pelo clima nas propriedades do solo e nos padrões climáticos cria flutuações imprevisíveis nos níveis de compostos orgânicos voláteis (COV), complicando a avaliação de longo prazo da IV e o gerenciamento de riscos, exigindo estratégias de amostragem e modelagem mais sofisticadas para prever a qualidade do ar interno futura.

As mudanças climáticas alteram as propriedades do solo, afetando a difusão e a advecção dos COV. Por exemplo, chuvas mais intensas podem infiltrar-se no solo, alterando seu teor de umidade e impactando a pluma de vapor sub-

TABELA 3 – Escopo do plano de trabalho recomendado por USEPA (2015a) em etapa de investigação detalhada para sítios com intrusão de vapores.

TABLE 3 – Scope of the work plan recommended by USEPA (2015a) in the detailed investigation stage for sites with vapor intrusion.

<i>Escopo mínimo recomendado</i>
• Descrição da(s) justificativa(s) e objetivo(s) da investigação • Resumo do modelo conceitual do sítio investigado • Mapa(s), em escala, ilustrando a extensão conhecida da contaminação do subsolo com zonas de referência prontamente identificáveis (e.g. ruas e edifícios) • Indicação do meio a ser amostrado • Compreensão de aspectos geológicos e hidrogeológicos locais • Localização, identificação, tipo e justificativa para os locais de amostragem • Avaliação da migração de COV na geologia local • Mapeamento de principais interferentes subterrâneos • Métodos e procedimentos de amostragem para cada meio • Métodos analíticos utilizados na quantificação das concentrações dos compostos de interesse e uma declaração sobre o tipo de laboratório (estacionário ou móvel) utilizado • Procedimento operacional padrão do laboratório e dos instrumentos de campo utilizados • Plano de garantia de qualidade do projeto • Plano de segurança • Profissionais com experiência na caracterização de condições ambientais do subsolo e interpretação de dados de campo • Profissionais de campo com treinamento e prática de trabalho de acordo com os protocolos de amostragem recomendados, promovendo saúde e segurança ocupacional

terrânea. Temperaturas mais elevadas alteram a pressão de vapor de compostos voláteis, possibilitando maior concentração em áreas sensíveis.

Mesmo o risco toxicológico e a forma de monitoramento sofrem distorções como efeito das mudanças climáticas, necessitando de tratamento estatístico dos dados, ao longo de um período extenso de observação. A flutuação de resultados, mesmo intradia, tem sido objeto de preocupação para pesquisadores de todo mundo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

Grifoni et al. (2022) apresentam, no entanto, que países em que a burocracia administrativa prevalece sobre as preocupações ambientais, convencer as partes interessadas, e particularmente as instituições de controle a considerar a mitigação, a adaptação e a resiliência climáticas no desenvolvimento de áreas contaminadas é extremamente difícil.

4 PROPOSTA PARA ESTUDO DE INTRUSÃO DE VAPORES EM MULTISSÍTIO

O presente estudo propõe uma metodologia de avaliação regional de intrusão de vapores em áreas urbanas nas quais foram gerados passivos ambientais em solos e águas subterrâneas através do aporte de resíduos líquidos (e.g. hidrocarbonetos de petróleo e solventes organoclorados), borras e resíduos sólidos contaminados por substâncias químicas tóxicas em zonas multissítio.

Além da recomendação de mapeamento das fases gasosas em subsuperfície, também é apresentado um modelo conceitual de drenagem dos gases detectados. O intuito dessa ação é zelar pelo controle e gerenciamento de risco toxicológico à saúde humana e/ou perigo que se observem, destacando-se, em especial:

- Risco toxicológico à saúde humana derivado da inalação de substâncias químicas perigosas;
- Risco de câncer decorrentes da toxicidade dos vapores carcinogênicos que adentrem o ambiente, em usuários em exposição crônica; e
- Risco de explosividade pelo acúmulo de gases comburentes, em áreas confinadas.

Como técnica central de extração de vapores, a Despressurização Abaixo do Piso (SSD - *sub-slab depressurization*) enquadra-se dentro das técnicas que mais crescem em aplicação mundialmente, em virtude de seu caráter sustentável (Sillos et al., 2019).

4.1 Etapas metodológicas recomendadas

O estudo regionalizado de uma área multissítio como Jurubatuba demanda um planejamento que deve atender ao interesse de consolidação de informações sobre o efeito sinérgico de vários sítios contaminados, no que tange seu impacto ambiental. O enfoque de gestão de riscos existentes no modelo de gestão individualizado adotado até o presente privilegiou a elaboração de estudos de avaliação de risco e investigação detalhada em que a IV não era mapeada. Portanto, para maior robustez dos modelos conceituais e avaliação da abrangência de impactos ambientais em sítios contaminados será importante a inclusão dessa temática (gases em subsuperfície), seguindo-se as etapas:

- i. Avaliação de dados prévios de estudos geológicos e hidrogeológicos locais, com apontamento de principais sítios contaminados;
- ii. Avaliação de zonas de maior risco ambiental que confira toxicidade à saúde da população exposta;
- iii. Definição de malha que atenda a estudo estatístico de contaminação por compostos orgânicos voláteis (COV);
- iv. Avaliação de campo de áreas representativas para instalação de pontos de avaliação e controle em subsuperfície e abaixo de lajes de edificações;
- v. Instalação de pontos de amostragem abaixo de piso (*subslabs*);
- vi. Amostragem de vapores conforme metodologia USEPA (2014, Método TO 17); e
- vii. Acondicionamento de amostras e envio a laboratórios de análise.

A avaliação deverá ser direcionada à identificação de SQI que estejam presentes em áreas públicas, e a partir disso determinar seu risco toxicológico, eventuais perigos de explosividade e zonas de origem. Com o tratamento de dados, eventualmente poder-se-á concluir pela necessidade de instalação de sistema de extração de vapores do tipo SSD para controle do risco existente. O modelo conceitual também deverá considerar a complexidade geológica da região e se há influência significativa da topografia, da composição do solo e dos recursos minerais na mobilidade, acúmulo, degradação, adsorção, geração e transporte do gás em subsuperfície.

Como referência espacial de investigação de gases em zonas multissítio, com base na métrica recomendada pela agência ambiental de New Jersey (NJDEP, 2018), tem-se a Tabela 4.

Ilustrativamente, a Figura 12 apresenta um mosaico sequencial fotográfico dos trabalhos de amostragem de intrusão de vapores.

Por meio do estudo recomendado para região de Jurubatuba, várias questões poderão ser mais bem compreendidas sobre o risco existente, a saber:

i. Necessidade de adensamento de pontos amostrais para refinamento do modelo conceitual de geração de gás em subsuperfície;

TABELA 4 – Escopo de amostragem de gases abaixo do piso e de ar ambiente em função da área construída. Fonte: NJDEP (2018).

TABLE 4 – Scope of sub-slab gas and ambient air sampling according to built area. Source: NJDEP (2018).

Área da construção (m²)	Número de amostras abaixo do piso	Número de amostras de ar ambiente
Até 140	2	1 a 2
140 a 460	3	2
460 a 930	4	3
930 a 1.860	5	4
1.860 a 4.600	6	5
4.600 a 23.230	8	6
23.230 a 92.900	10	7
Acima de 92.900	12+	9+

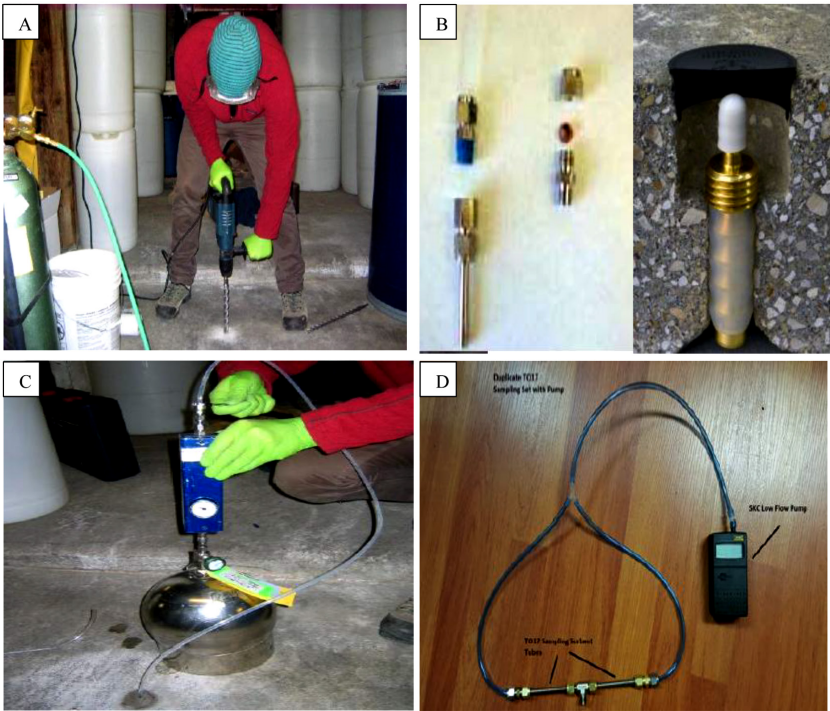


FIGURA 12 – Procedimento padrão para a amostragem de vapores embaixo do piso. A) Sondagem com perfuradora em laje de concreto; B) Instalação de *vapour-pins* para monitoramento de gases abaixo do piso; C) Avaliação da selagem e estanqueidade dos poços de monitoramento instalados por meio do uso de gás hélio; D) Amostragem de vapores com tubos adsortivos e bomba de circulação de ar.

FIGURE 12 – Standard procedure for sampling vapors beneath the floor. A) Drilling on a concrete slab; B) Installation of vapor pins for monitoring subfloor gases; C) Assessment of the sealing and tightness of the installed monitoring wells using helium gas; D) Vapor sampling with adsorptive tubes and air circulation pump.

- ii. Avaliação da mobilidade de gases na área;
- iii. Compreensão da conectividade de camadas litológicas e comparação com estudos prévios da contaminação observada;
- iv. Compreensão de como a geologia e hidrogeologia locais influenciam o contato entre contaminantes e população local, agravando a exposição a riscos toxicológicos originários de gases em subsuperfície (Destaca-se que o transporte de SQI regionalizado pela presença de fraturas e fissuras nas rochas do embasamento cristalino foi fundamental para distribuição regional de contaminantes);
- v. O papel das instalações existentes e o aporte de gases nas estruturas e interferentes subterrâneos;
- vi. Compreensão local da dinâmica dos vapores (decomposição de matéria orgânica - metagênese) do solo e sua relação com gases tóxicos existentes em subsuperfície.

O presente estudo e suas conclusões visam a contribuir com uma base sólida para o desenvolvimento de um modelo conceitual de mitigação de impactos ambientais existentes. Portanto, por meio da avaliação inicial dos vapores em subsuperfície, serão definidos métodos de drenagem desses gases de modo a permitir o uso seguro da área avaliada e o controle dos riscos toxicológicos.

4.2 Medidas de mitigação

Medidas voltadas à prevenção da migração de vapores para o interior de construções são muitas vezes necessárias para evitar a possível exposição de receptores. Diversas técnicas podem ser implementadas de forma integrada para eliminar

ou atenuar a via de IV durante as atividades de gerenciamento do sítio contaminado. A escolha dos métodos de mitigação para IV deve ser fundamentada no tipo de uso da construção afetada pela contaminação, no tempo de implementação do sistema de remediação, nas condições do meio físico local, nos objetivos e na viabilidade do projeto em curto e longo prazo (Baker et al., 2016).

Técnicas conservativas de remediação de vapores, como os sistemas de despressurização do solo, são capazes de reduzir ou eliminar o aporte de gases em ambientes fechados, uma vez que, ao invés de tratar o ar interno contaminado, essas técnicas evitam a migração desses vapores (McHugh et al., 2017). Os métodos de mitigação de vapores podem ser agrupados em três categorias (Wisconsin Department of Natural Resources, 2018):

- i. Despressurização ativa;
- ii. Controle ativo do ar em ambiente interno;
- iii. Controle passivo.

Os sistemas ativos utilizam ventiladores que permitem a extração e a renovação do ar (Diallo et al., 2015). Já os sistemas passivos são projetos que não utilizam operações mecânicas, como barreiras passivas (USEPA, 2015a). Os métodos de despressurização ativa são os mais amplamente utilizados na redução das concentrações de contaminantes atribuídos à IV em ambientes internos (Lutes et al., 2015; NJDEP, 2018) e são considerados os mais eficazes (Tabela 5). As barreiras passivas também são capazes de reduzir a intrusão de vapores, contudo sua utilização de forma isolada pode não ser adequada, sendo recomendado o uso combinado com técnicas de despressurização ativa (Price et al., 2017).

TABELA 5 – Possibilidade de descontaminação em etapa de mitigação de IV. Modificado de Wisconsin Department of Natural Resources (2018).

TABLE 5 – Possibility of decontamination in the mitigation stage of vapor intrusion. Modified from Wisconsin Department of Natural Resources (2018).

<i>Uso da terra e tipo de construção</i>	<i>Despressurização ativa</i>	<i>Controle ativo do ar em ambiente interno</i>	<i>Controle passivo</i>
<i>Construções pré-existentes</i>			
Residencial	Sim	Raro	Raro
Uso misto	Sim	Depende	Raro
Não residencial	Sim	Depende	Raro
<i>Novas construções</i>			
Residencial	Sim	Depende	Depende
Uso misto	Sim	Depende	Depende
Não residencial	Sim	Sim	Depende

O SSD é uma técnica de despressurização ativa capaz de atenuar os vapores do solo através da geração de gradientes negativos de pressão abaixo do piso, impedindo o transporte advectivo dos gases em direção ao interior das construções (Ma et al., 2020; NJDEP, 2018). Os sistemas de SSD lidam com a intrusão de vapores de compostos orgânicos voláteis através da adaptação de projetos, critérios operacionais e comissionamento desenvolvidos anteriormente pela indústria do radônio (Lutes et al., 2015).

Para novas construções, o projeto padrão de SSD (Figura 13) é composto por (i) uma camada permeável a gases imediatamente sotoposta à laje do piso mais baixo da construção, (ii) tubulações e poços de sucção no interior da camada permeável e (iii) *risers* verticais conectados a um ventilador de sucção posicionado acima da construção ou em área externa (Joseph, 2023). A instalação de sistemas SSD em construções pré-existentes prevê: (i) abertura de orifícios na laje da construção, (ii) remoção do solo abaixo da laje para a formação de bolsões de sucção, (iii) colocação de *risers* verticais nos orifícios da laje conectados a um ventilador de sucção acima da construção ou em área externa e (iv) vedação das aberturas ao redor dos *risers* (USEPA, 2015a). A técnica de SSD é considerada a estratégia de mitigação de IV mais prática e acessível para a maioria das construções, sendo instalada e operada com sucesso em uma ampla variedade de edifícios, tanto comerciais quanto residenciais (USEPA, 2015a).

Para a área do Arco Jurubatuba, o mapeamento de gases em subsuperfície e a avaliação de seu risco possibilitarão o desenvolvimento de uma estratégia de drenagem e tratamento desses gases, saneando a região contra eventuais riscos toxicológicos à saúde humana que existam. Para tal, um novo estudo deve ser elaborado, focado em zonas em que se tenha histórico de passivos ambientais com plumas de contaminantes com alto teor de gases em subsuperfície.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO DE ESTUDOS DE IV NO ARCO JURUBATUBA

Modelos conceituais constituem estratégias de gestão de passivos ambientais e áreas contaminadas, sendo que a diferença entre seu uso para investigação de uma única área contaminada e para múltiplos sítios está na escala, complexidade e interconexão dos dados. Sua aplicação em multissítios permite o controle e ordenamento de informações, possibilitando a determinação de aspectos relevantes à compreensão da complexidade destes cenários, tais como a abrangência da área, o volume do material que constitui as fontes de contaminação, os caminhos preferenciais de fluxo associados à geologia estrutural, condições geoquímicas do meio, características das SQI, entre outras (Hart et al., 2021; Sillos et al., 2019). Embora os modelos conceituais para áreas individuais e para multissítios sigam a mesma lógica básica de identificação de fontes, vias e receptores, o modelo multissítios exige uma abordagem mais ampla e uma análise de

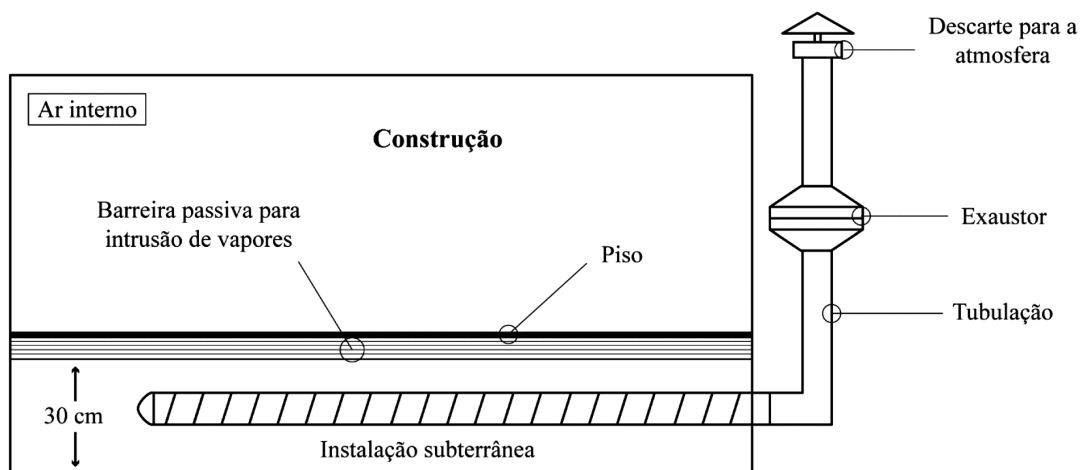


FIGURA 13 – Sistema de despressurização abaixo do piso com barreira passiva para intrusão de vapor.

FIGURE 13 – Illustration of the Sub-Slab Depressurization system with a passive barrier to vapor intrusion.

como a contaminação pode interagir e migrar entre as diferentes áreas.

O caso do Arco Jurubatuba, com sua restrição tardia à captação e ao consumo de águas subterrâneas contaminadas por SQI carcinogênicas reforça a distância entre a informação de um risco ou perigo decorrente de um passivo ambiental e a celeridade do Estado na adoção de medidas de controle (Sillos, 2006). Nesse contexto, as populações economicamente vulneráveis tornam-se mais suscetíveis aos impactos ambientais existentes. No caso de Jurubatuba, estima-se que cerca de 150 mil habitantes (1,25% da população paulistana) estejam potencialmente expostos a esses riscos. O entendimento do efeito sinérgico desses passivos ambientais ainda é incipiente, mas sua avaliação é necessária e urgente.

Adicionalmente à problemática de captação do aquífero local impactado por COV, o fator IV deve ser considerado pela gravidade que traz, seja por questões de perigo (explosividade de hidrocarbonetos), seja por risco toxicológico à saúde humana (solventes clorados carcinogênicos, por exemplo).

A migração de vapores, a composição do ar em ambientes internos e métodos adequados de amostragem que representem de forma satisfatória a dinâmica das concentrações dos contaminantes, tornam a quantificação dos riscos associados à IV uma tarefa difícil, em função da complexidade que demanda a devida caracterização de variáveis, como caminhos preferenciais, variações térmicas e barométricas, entre outras. Além disso, novas dificuldades são observadas decorrentes das mudanças climáticas e seus efeitos nos meios impactados. Alterações nas propriedades do solo afetam a difusão e a advecção dos COV e chuvas mais intensas alteram seu teor de umidade, impactando a pluma de vapor subterrânea. Temperaturas mais elevadas aumentam a pressão de vapor de compostos voláteis, possibilitando maior concentração em áreas sensíveis. Portanto, fatores como temperatura do ar, pressão barométrica, ventos de superfície e umidade do solo, incluindo os efeitos de qualquer infiltração de água e/ou alterações no nível das águas subterrâneas afetam direta ou indiretamente as taxas de transporte de gás na zona vadosa, alterando as concentrações de gás no solo em um determinado local e profundidade.

A avaliação de zonas de ARC Jurubatuba classificadas como Alta Restrição, onde há regiões de maior densidade de Atividades com Elevado Potencial de Contaminação (AEPC), presença

de poços com detecção de compostos organoclorados e áreas declaradas contaminadas com esses compostos, permitirá dimensionar a gravidade da presença de solventes clorados e hidrocarbonetos em forma gasosa nas edificações locais. Coloque-se, contudo, a questão relativa às áreas adjacentes aos *brownfields*: o que se pode antecipar quanto ao seu comportamento ambiental e à propagação dos contaminantes? Quando existem dezenas de áreas contaminadas concentradas em uma mesma região, torna-se plausível o risco de migração de gases para zonas de uso público – como escolas, espaços comerciais, praças ou teatros –, o que exige uma avaliação integrada do risco e das medidas de mitigação associadas.

Recomenda-se que futuros estudos tenham como princípio central a avaliação da gravidade do tema de IV em áreas sensíveis, incorporando um sistema de mapeamento de risco toxicológico que acione as autoridades competentes. Isso permitiria orientar ações de mitigação, além de garantir a publicidade e a transparência que a sociedade exige em questões tão sensíveis de saúde pública e risco ambiental.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores da revista *Derbyana* pelas contribuições que enriqueceram o manuscrito. As autoras Ana Paula F. da Silva e M. Graça Brito agradecem o apoio prestado pela Unidade de I&D GEOBIOTEC–UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, F., Hendrickx, L., Turcanu, C., Sweeney, L., & Van Orshoven, J. (2024). Multi-criteria decision analysis to support the remediation of polluted soils: A review of case studies. *Land*, 13(6), Article 887. <https://doi.org/10.3390/land13060887>
- Baker, C. D., Polito, K. E., Governor, L., Beaton, M. A., & Suuberg, M. (2016). *Vapor intrusion guidance: Site assessment, mitigation and closure*. MassDEP. <https://www.mass.gov/doc/wsc-16-435-vapor-intrusion-guidance-site-assessment-mitigation-and-closure/download>
- Barbosa, M., Bertolo, R. A., & Hirata, R. (2017). A method for environmental data management

- applied to megasites in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 322–338. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.93021>
- Barbosa, M. B. (2015). *Sistema de informações geográficas aplicado ao gerenciamento da contaminação da antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo* [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. <http://doi.org/10.11606/D.44.2015.tde-27082015-093148>
- Butt, T. E., Akram, H., Mahammedi, C., & House, C. (2020). Conceptual site model: An intermediary between baseline study and risk assessment. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 129(8), 101–108. <https://doi.org/10.2495/RISK200091>
- Campos, J. E., Ferreira, L. M. R., Albuquerque Filho, J. L., & Kakazu, M. C. 2002. Síntese do conhecimento hidrogeológico da Bacia Sedimentar de São Paulo. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 14 p. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/22850/15000/0#:~:text=SEQU%C3%8ANCIA%20ESTRATIGR%C3%81FICA,da%20Bacia%20do%20Alto%20Tiet%C3%AA>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2017). *Decisão de Diretoria Nº 38/2017/C, de 07 fevereiro de 2017*. Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências. <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2024a). *Relação de áreas contaminadas*. Acessado em 25 set. 2025. <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2024b). *Decisão de Diretoria Nº 056/2024/E, de 22 de Julho de 2024*. Dispõe sobre o agrupamento em blocos das etapas do gerenciamento de áreas contaminadas e o procedimento de solicitação de Pareceres Técnicos para submissão à CETESB dos relatórios referentes à execução das etapas do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, descritas no Anexo II da Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, em consonância com a Lei Estadual nº 13.577/2009, seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, o Decreto Estadual 62.973/2017 e dá outras providências. <https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/2024/07/DD-056-2024-E-Agrupamento-em-blocos-etapas-gerenciamento-areas-contaminadas.pdf>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo / Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. (2025a). *Empreendimento Contaminacao_SGP*. https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/server/rest/services/SIGAM/Empreendimento_Contaminacao_SGP/MapServer
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo / Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (2025b). *Manual de gerenciamento de áreas contaminadas*. E. Gloeden, A. S. Oliveira, & F. R. S. Pereira (Orgs.), 3ª ed. rev. ampliada. <https://cetesb.sp.gov.br/areascontaminadas/Manual-GAC-3-ed-rev-ampl-2025.pdf>
- Chen, I.-C., Chuo, Y.-Y., & Ma, H.-W. (2018). Uncertainty analysis of remediation cost and damaged land value for brownfield investment. *Chemosphere*, 220, 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.116>
- Chetri, J. K., Pimentel, S., Kandou, V., D'Angelo, J., & Reddy, K. R. (2025). Climate adaptive contaminated site remediation: Review of case studies. *Proceedings of Geo-EnvironMeet 2025*. <https://doi.org/10.1061/9780784485705.015>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. (2011). *Deliberação CBH-AT, nº 01 de 16 de fevereiro de 2011*. Que estabelece áreas de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba e dá outras providências.

- https://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation/5112/del_cbh-at.pdf
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. (2021). *Deliberação nº 139, de 15 de dezembro de 2021*. Rerratifica a área de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo. [https://comiteat.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/Delibera%C3%A7%C3%83o-CBH-AT-n%C2%BA-139-de-15.12.2021-Rerratifica-a-a-%CC%81rea-de-restric%C3%A7%C3%83o-e-controle-para-a-capta%C3%A7%C3%83o-e-uso-das-a-%CC%81guas-subterra%C3%82neas-no-munici%C3%81pio-d.pdf](https://comiteat.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/Delibera%C3%A7%C3%83o-CBH-AT-n%C2%BA-139-de-15.12.2021-Rerratifica-a-%CC%81rea-de-restric%C3%A7%C3%83o-e-controle-para-a-capta%C3%A7%C3%83o-e-uso-das-%CC%81guas-subterra%C3%82neas-no-munici%C3%81pio-d.pdf)
- Conselho Estadual de Recursos Hídricos. (2011). *Deliberação CRH nº 132, de 19 de abril de 2011*. Homologa a Deliberação CBH-AT nº 01 de 16 de fevereiro de 2011 que estabelece área de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba, e dá outras providências. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. https://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation/5112/del_crh_132.pdf
- Conselho Estadual de Recursos Hídricos. (2022). *Deliberação CRH nº 265 de 28 de abril de 2022*. Referenda a Deliberação CBH-AT nº 139, de 15 de dezembro de 2021 que "Rerratifica a Área de Restrição e Controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba e dá outras providências". Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation/CRH/22060/delib-crh-265_jurubatuba-ctas.pdf
- Cramer, R., Parker, B. L., Stapleton, J. M. (2025). Remediation geology and process-based conceptual site models to optimize groundwater remediation. *Sustainability*, 17(5), Article 2027. <https://doi.org/10.3390/su17052027>
- Cravo, T. (2021). Estrutura e dinâmica do trabalho compulsório e livre na infraestrutura viária do Império do Brasil: Africanos livres, escravizados e livres (1854-1856). *História*, 40, Artigo e2021060. <https://doi.org/10.1590/1980-4369e2021060>
- De Sousa, C., Carroll, A. M. M., Whitehead, S., Coffin, S., Heberle, L., Hettiarachchi, G., Martin, S., Sullivan, K., & Van Der Kloot, J. (2023). A review of brownfields revitalisation and reuse research in the US over three decades. *Local Environment*, 28(12), 1629–1654. <https://doi.org/10.1080/13549839.2023.2248625>
- Departamento de Águas e Energia Elétrica/ Instituto Geológico/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/Serviço Geológico do Brasil. (2005). *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000*. Coordenação geral: G. Rocha, São Paulo, DAEE/IG/IPT/CPRM, 3 v., inclui CD-ROM e mapa.
- Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. F., Dehkordi, K. S., Salmanvandi, H., Khorjestan, R. R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 23, Article 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>
- Diallo, T. M. O., Collignan, B., & Allard, F. (2015). 2D Semi-empirical models for predicting the entry of soil gas pollutants into buildings. *Building and Environment*, 85, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.013>
- Dias, L. G. (2021). *Identificação de poços profundos localizados próximos de áreas contaminadas em zonas industriais da região metropolitana de São Paulo* [Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade de São Paulo]. São Paulo. Biblioteca Digital de Trabalhos Acadêmicos da USP. <https://bdta.abcd.usp.br/item/003069365>
- Eklund, B. (2024). Climatic effects on vapor flow and behavior in the vadose zone. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 44(4), 80–91. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12682>
- Eklund, B., Beckley, L., & Rago, R. (2018). Overview of state approaches to vapor intrusion: 2018. *Remediation*, 28(4), 23–35. <https://doi.org/10.1002/rem.21573>

- Eklund, B., Regan, C., Rago, R., & Beckley, L. (2024). Overview of state approaches to vapor intrusion: 2023 update. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 44(3), 76–93. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12627>
- Freitas, G. B. (2017). Gerenciamento de áreas contaminadas: contratos celebrados com a Prefeitura e Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 31(5). <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28985>
- Gavrilaş, S., Burescu, F. L., Chereji, B. D., & Munteanu, F. D. (2025). The Impact of Anthropogenic Activities on the Catchment's Water Quality Parameters. *Water*, 17(12), Article 1791. <https://doi.org/10.3390/w17121791>
- Goosen, J., & Fitchett, A. (2019). Success factors for urban brownfield developments in Johannesburg, South Africa. *Urban Forum*, 31, 41–59. <https://doi.org/10.1007/s12132-019-09366-4>
- Green, T. L. (2018). Evaluating predictors for brownfield redevelopment. *Land Use Policy*, 73, 299–319. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.01.008>
- Grifoni, M., Franchi, E., Fusini, D., Voccianti, M., Barbaferi, M., Pedron, F., Rosellini, I., & Petruzzelli, G. (2022). Soil remediation: towards a resilient and adaptive approach to deal with the ever-changing environmental challenges. *Environments*, 9(2), Article 18. <https://doi.org/10.3390/environments9020018>
- Gueresi, S. (2024). A matrioska de instrumentos urbanísticos nos Projetos de Intervenção Urbana em São Paulo. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 26(1). <https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202419pt>
- Hart, S. T., Bertolo, R. A., Agostini, M. S., Feig, R., Barbosa, M. B., & Lima, P. L. (2021). Temporal conceptual model of contaminated complex sites applied for the management of a former supply well area in tropically weathered bedrock. *Sustainable Water Resources Management*, 7, Article 11. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00488-x>
- Hart, S. T., Bertolo, R. A., Feig, R., Barreto, F. S., Di Giovanni, J. C. D. G., Gouvêa Júnior, J. C. R., & Agostini, M. S. (2023). Modelagem implícita para detalhamento do Modelo Conceitual Temporal de Área Complexa com remediação de plumas combinadas na Região Metropolitana de São Paulo. *Geologia USP - Série Científica*, 23(3), 57–70. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-207070>
- Hirata, R. C. A., & Ferreira, L. M. R. (2001). Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(1), 43-50. <https://ppegeo.igc.usp.br/porta1/wp-content/uploads/tainacan-items/15906/43795/10443-12448-1-SM.pdf>
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., O'Connor, D., Hu, Q., Zhu, Y. G., Wang, L., Kirkwood, N., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Bolan, N. S., & Rinklebe, J. (2023). Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 271–286. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00404-1>
- Hou, D., & O'Connor, D. 2020a. Green and sustainable remediation: concepts, principles, and pertaining research. In D. Hou (Ed.), *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater* (pp. 1-17). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00001-X>
- Hou, D., & O'Connor, D. 2020b. Green and sustainable remediation: past, present, and future developments. In D. Hou (Ed.), *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater* (pp. 19-42). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00002-1>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Censo Demográfico 2020*. Acessado em 13 jul. 2025. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-2020-censo4.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

- (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press.
- Interstate Technology and Regulatory Council. (2017). *Remediation management of complex sites*. <https://rmcs-1.itrcweb.org/>.
- Joseph, S. (2023). Radon—mitigatory and control measures. In: *Environmental Radon* (p. 167–184). Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2672-5_8
- Kram, M., Hartman, B., Frescura, C., Negrao, P., & Egelton, D. (2020). Vapor intrusion risk evaluation using automated continuous chemical and physical parameter monitoring. *Remediation*, 30(3), 65–74. <https://doi.org/10.1002/rem.21646>
- Kresic, N., & Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological conceptual site models: Data analysis and visualization*. CRC Press.
- Laemmel, T., Mohr, M., Longdoz, B., Schack-Krichner, H., Lang, F., Schindler, D., & Maeir, M. (2019). From above the forest into the soil: How wind affects soil gas transport through air pressure fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.007>
- L'Apicciarella, E. S. P., Bertolo, R., Hirata, R., Simonato, M. D., Carvalho, A. M., Campos, J. E., Rocha, G., Surita, C., Conicelli, B. P., Pillon, A. M., Abreu, M. C., Wendland, E. (2005). Metodologia para a definição de área de restrição e controle de uso de água subterrânea do entorno do Canal Jurubatuba. *Anais do I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*.
- L'Apicciarella, E. S. P. (2009). *Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do Canal Jurubatuba em São Paulo - SP* [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2009.tde-14102009-094432>
- Lehigh, G. R., Wells, E. C., & Diaz, D. (2020). Evidence-informed strategies for promoting equitability in brownfields redevelopment. *Journal of Environmental Management*, 261, Article 110150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110150>
- Li, X., Cundy, A. B., Chen, W., Lyu, S. (2021). Systematic and bibliographic review of sustainability indicators for contaminated site remediation: Comparison between China and western nations. *Environmental Research*, 200, Article 11490. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111490>
- Liao, Q. (2023). *Creative Strategies to Recover Urban Land in Disuse* [Tesis Doctorals, Universitat de Barcelona]. Dipòsit Digital. <https://hdl.handle.net/2445/208941>
- Lima, P. L. (2018). *Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em um aquífero cristalino fraturado e intemperizado Jurubatuba-São Paulo-SP* [Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-03082020-112622>
- Liu, X. & Jin, P., Yang, Z., Wei, C., Bardos, P., Ding, D., Zhang, Z., Song, X. (2024). An evaluation approach for sustainable mega-site remediation in China integrated with remedial duration, *Pedosphere*, 2024, in press, journal pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.07.008>
- Lonati, G., Saponaro, S., & Sezenna, E. (2019). Vapor intrusion evaluation for redevelopment of former industrial facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296, Article 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012011>
- Loures, L., & Vaz, E. (2018). Exploring expert perception towards brownfield redevelopment benefits according to their typology. *Habitat International*, 72, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.11.003>
- Lutes, C. C., Truesdale, R. S., Cosky, B. W., Zimmerman, J. H., & Schumacher, B. A. (2015). Comparing vapor intrusion mitigation system performance for VOCs and Radon. *Remediation*, 25: 7-26. <https://doi.org/10.1002/rem.21438>

- Ma, J., McHugh, T., Beckley, L., Lahvis, M., DeVaul, G., & Jiang, L. (2020). Vapor intrusion investigations and decision-making: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7050–7069. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00225>
- McHugh, T., Loll, P., & Eklund, B. (2017). Recent advances in vapor intrusion site investigations. *Journal of Environmental Management*, 204, 783–792. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.015>
- New Jersey Department of Environmental Protection. (2018). *Vapor intrusion technical guidance (Version 4.1)*. Site Remediation and Waste Management Program. <https://www.nj.gov/>
- NICOLE, Latin America Network for Soil and Water Management. (2023). *Position paper: gerenciamento de áreas complexas e megasites na américa latina*. Grupo de trabalho de Áreas Complexas e Megasites. Acessado em 20/10/2025. https://nicolelatinamerica.com/wp-content/uploads/2023/08/Position-Paper_Areas-Complexas-e-Megasites_PT.pdf
- National Research Council. (2013). *Alternatives for managing the nation's complex contaminated groundwater sites: Committee on future options for management in the nation's subsurface remediation effort*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14668>
- O'Leary, B. F., Miller, C. J., Selegan, K., & Hood, G. R. (2025). Comparing convenperrottational and phytoscreening methods to detect subsurface chemical contaminants: A test case of volatile organic compounds in an urban setting. *Environmental Pollution*, 365, Article 125374. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125374>
- Oliver, L., Ferber, U., Grimski, D., Millar, K., & Nathanail, P. (2014). The scale and nature of European brownfield.
- e recursos minerais do estado de São Paulo: Sistema de Informações Geográficas – SIG*. Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo.
- Pino, D. S., Bertolo, R., Lojkasek-Lima, P., Fernandes, A. J., Parker, B., & Hirata, R. (2021). Discrete fracture network characterization using multiple, high-resolution borehole methods in a crystalline rock aquifer in tropical São Paulo city, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102911. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102911>
- Price, J., Spreng, C., Hawley, E. L., & Deeb, R. (2017). Remediation management of complex sites using an adaptive site management approach. *Journal of Environmental Management*, 204(2), 738–747. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.009>
- Santoro, M., Minichilli, F., Pierini, A., Astolfi, G., Bisceglia, L., Carbone, P., Conti, S., Dardanoni, G., Iavarone, I., Ricci, P., Scarano, G., Bianchi, F., & Riscipro_Sentieri Working Group. (2017). Congenital anomalies in contaminated sites: A multisite study in Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, 292. <https://doi.org/10.3390/ijerph14030292>
- São Paulo (Prefeitura). (2016). *Arco Jurubatuba - Nota Técnica*. Acessado em 10 ago. 2025. https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/12/ACJ_NotaTecnica.pdf
- São Paulo (Prefeitura). (2018). *Projeto de Intervenção Urbana Arco Jurubatuba - Nota Técnica*. Acessado em 10 ago. 2025. https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/NOTA_TECNICA_PLANO_URBANISTICO.pdf
- São Paulo (Prefeitura). (2020). *Plano Diretor Estratégico da Cidade de São Paulo*. <https://www.prefeitura.sp.gov.br>
- São Paulo (Prefeitura). (2023). *Lei N° 17.965, de 19 de junho de 2023*. Dispõe sobre a revisão intermediária do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo, aprovado pela Lei n° 16.050, de 31 de julho de 2014, nos

- termos da previsão de seu art. 4º. <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17965-de-19-de-junho-de-2023>
- São Paulo (Prefeitura). (2024). *Lei N° 18.178, de 25 de julho de 2024*. Substitui os Mapas e Quadros anexos à Lei nº 17.965, de 31 de julho de 2023, que aprova o Plano de Intervenção Urbana Arco Jurubatuba e cria as Áreas de Intervenção Urbana Vila Andrade, Jurubatuba e Interlagos, e dá outras providências. <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-18178-de-25-de-julho-de-2024/consolidado>
- Schlappa, H., & Ferber, U. (2016). Managing brownfield land in stagnant land markets. In H. Schlappa, & W. B. V. Neill (Eds.), *Future Directions for the European Shrinking City* (RTPI Library Series). Taylor & Francis Group.
- Sillos, M. (2006). *Valorização de processos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos do petróleo* [Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas]. https://sapiens.ipt.br/Teses/2006_TA_Marcos_Sillos.pdf
- Sillos, M. (2023). *Remediação sustentável resiliente às mudanças climáticas* [Plano de Tese de Doutorado em Engenharia Geológica, FCT Nova, Lisboa].
- Sillos, M., Nascimento, S. C., Kurozawa, S. S., Mello, K. A., & Alvarez, S. M. (2019). Improvement of the soil/sediment cleaning technique. *Proceedings of Battelle Sediments Conference*, New Orleans, USA.
- Sillos, M., Nascimento, S. C., Mattos, I. C., Locatelli, M. A. F., Jardim, W. F., & Kurozawa, S. (2014). PCE/TCE degradation under ZVI nano/tritigum durum scale treatability study of PCE. *Proceedings of Battelle Conference*.
- Sillos, M., Nascimento, S. C., Passarelli, A., Oliveira, R. G. R., & De Sousa, S. B. (2015). Rehabilitation of an old industrial area in Rio de Janeiro, Brazil, contaminated by chlorinated compounds. Vapour Intrusion Solutions. *Proceedings of Battelle Conference*.
- Sillos, M., Silva, P. F., Suhogusoff, A., & Brito, M. G. (2025). Climate-resilient and sustainable soil remediation: Hydrocycloning for metal removal in flood-prone Brazilian region. *Sustainability*, 17, Article 9083. <https://doi.org/10.3390/su17209083>
- Siqueira-Gay, J., Gallardo, A. L. F. F., & Giannotti, M. (2019). Integrating socio-environmental spatial information to support housing plans. *Cities*, 91, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.11.010>
- Strom, E. (2018). Brownfield redevelopment: Recycling the urban environment. In R. Brinkmann, & S. Garren (Eds.) *The Palgrave Handbook of Sustainability* (pp. 371–384). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71389-2_20
- United States Environmental Protection Agency. (2014). *Vapor intrusion screening level (VISL) calculator user's guide*. <https://www.epa.gov/vaporintrusion/vapor-intrusion-screening-level-calculator-users-guide>
- United States Environmental Protection Agency. (2015a). *OSWER technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/oswer-vapor-intrusion-technical-guide-final.pdf>
- United States Environmental Protection Agency. (2015b). *Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites*. <https://www.epa.gov/vaporintrusion/technical-guide-addressing-petroleum-vapor-intrusion-leaking-underground-storage>
- United States Environmental Protection Agency. (2023). *Remediation technologies screening matrix and reference guide*. The U. S. Army Environmental Center.
- United States Environmental Protection Agency. (2024). *Overview of EPA's Brownfields Program*. <https://www.epa.gov/brownfields>
- Vestbro, D. U. (2007). Conflicting perspectives in the development of Hammarby Sjöstad, Stockholm. In D. U. Vestbro (Ed.) *Rebuilding the city: Managing the built environment*

and remediation of brownfield (pp. 34-41). Baltic University Urban Forum: Urban Management Guidebook IV. The Baltic University Press. https://www.researchgate.net/publication/272019386_Conversion_of_military_brownfields_in_Oulu

Wei, X., Maruthaveeran, S., Shahidan, M. F., & Sha, T. (2025). To develop or to be abandoned again? Tourism spatial quality assessment of brownfield landscape regeneration: A case study of Xi'an Banpo International Art Park, China. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 51, Article 100933. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2025.100933>

Wisconsin Department of Natural Resources. (2018). *Addressing vapor intrusion at remediation & redevelopment sites in Wisconsin*. Wis. Stat. ch. 292; Wis. Admin. Code ch. NR 700. Remediation and Redevelopment Program. https://services.statecapex.com/ssu/Regs/ss_8586793372757262586.pdf

Zhang, L., Wang, Y., Ding, Q., & Shi, Y. (2025). Current status and prospects of ecological restoration and brownfield reuse research based on bibliometric analysis: a literature review. *Land*, 14(6), Article 1185. <https://doi.org/10.3390/land14061185>

Manuscrito submetido em 17 de outubro de 2025, aceito em 26 de outubro de 2025.

Como citar: Sillos, M., Brito, G., Suhogusoff, A., & Silva, P.F. (2025). Modelo conceitual multissítios como ferramenta estratégica para gestão de *brownfields*: o caso do Arco Jurubatuba (Brasil). *Derbyana*, 46, Artigo e885.

Contribuição dos autores: M.S.: Conceituação, Análise de dados & Pesquisa, Metodologia, Redação, Revisão e edição, Elaboração de figuras. G.B.: Conceituação, Metodologia, Revisão e edição. A.S.: Revisão e edição. P.F.S.: Metodologia, Revisão e edição.

Conflito de interesses: Os autores declaram que não há conflito de interesses.

