

**Representação de coreografias virtuais
interativas com recurso ao Three.js: o caso de
uso das manchas de óleo**

Yaraslau Maksimchyk

Mestrado em Multimédia da Universidade do Porto

Orientador: Prof. Fernando Cassola

Coorientador: Prof. Alexandre Valle de Carvalho

Julho de 2025

Representação de coreografias virtuais interativas com recurso ao Three.js: o caso de uso das manchas de óleo

Yaraslau Maksimchyk

Mestrado em Multimédia da Universidade do Porto

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Professor Doutor Jorge Manuel Gomes Barbosa

Arguente: Professor Doutor Ricardo José Vieira Baptista

Orientador: Professor Doutor Fernando José Cassola Marques

Resumo

A representação de fenómenos ambientais complexos, como as manchas de óleo em meio oceânico, exige abordagens visuais que aliem rigor informativo, clareza e interatividade. Apresenta-se uma solução tridimensional que permite explorar a evolução espacial e temporal destes fenómenos, promovendo uma leitura acessível e informada da sua dinâmica à escala global.

A investigação baseou-se na hipótese de que uma coreografia virtual, entendida como a sincronização contínua de múltiplas camadas de dados, poderia melhorar a compreensão visual da dispersão e progressão das manchas. O percurso metodológico seguiu o modelo *Design Science Research* (DSR), estruturado em ciclos iterativos de conceção, desenvolvimento e avaliação empírica com utilizadores.

O artefacto desenvolvido integrou mecanismos interativos que articulam visualização tridimensional, linha temporal e dados complementares. A avaliação, realizada em duas fases com públicos distintos, revelou elevada aceitação da solução, identificando melhorias significativas na clareza, usabilidade e eficácia interpretativa da representação proposta.

Os resultados obtidos confirmam o potencial das visualizações interativas como ferramentas para comunicar, explorar e refletir criticamente sobre fenómenos ambientais, reforçando a sua utilidade em contextos de análise, educação e tomada de decisão.

Palavras-chave: visualização tridimensional, coreografias virtuais, manchas de óleo, representação ambiental

Abstract

The representation of complex environmental phenomena, such as oil spills in oceanic contexts, requires visual approaches that combine informational rigour, clarity and interactivity. This work introduces a three-dimensional solution that enables the exploration of the spatial and temporal evolution of such phenomena, supporting an accessible and informed reading of their global dynamics.

The investigation was grounded in the hypothesis that a virtual choreography, understood as the continuous synchronisation of multiple data layers, could enhance visual comprehension of the dispersion and progression of oil spills. The methodological approach followed the Design Science Research (DSR) model, structured around iterative cycles of design, development and empirical evaluation with users.

The artefact developed integrates interactive mechanisms that combine three-dimensional visualisation, temporal navigation and contextual data. Evaluation conducted in two stages with distinct user groups demonstrated strong acceptance of the solution, highlighting significant improvements in clarity, usability and interpretative effectiveness.

The results confirm the potential of interactive visualisations as tools for communicating, exploring and critically reflecting on environmental phenomena, reinforcing their relevance in contexts of analysis, education and decision-making.

Keywords: three-dimensional visualisation, virtual choreography, oil spills, environmental representation

Agradecimentos

A realização desta dissertação representou um desafio exigente, sobretudo pela necessidade de conciliar o seu desenvolvimento com uma atividade profissional a tempo inteiro. Ainda assim, constituiu uma oportunidade valiosa para aprofundar conhecimento, exercitar pensamento crítico e explorar novas abordagens para a representação de dados complexos.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional, pela paciência nos momentos mais exigentes e pela motivação constante ao longo de todo o percurso. Aos orientadores, Professor Fernando Cassola e Professor Alexandre Valle de Carvalho, expresse a minha gratidão pela orientação segura, pela disponibilidade e pela confiança depositada na condução desta dissertação.

Gostaria ainda de agradecer ao projeto ILIAD – Digital Twins of the Ocean, enquadrado no programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101037643, pelo enquadramento científico e temático que sustentou esta investigação.

Por fim, reconheço o esforço pessoal que este processo exigiu. A conclusão desta fase representa também um reflexo de resiliência, disciplina e dedicação, valores que me acompanharam ao longo de todas as etapas deste trajeto académico.

“A paciência e o tempo — eis os meus guerreiros mais poderosos.”

Lev Tolstoy

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Contexto, enquadramento e motivação.....	1
1.2 Problema, hipótese e objetivos da investigação.....	2
1.3 Metodologia da investigação	3
1.4 Estrutura da dissertação	5
2. Revisão bibliográfica.....	6
2.1 Revisão da literatura	6
2.2 Estado da arte.....	9
2.3 Revisão tecnológica	13
3. Metodologia e conceção da representação	17
3.1 Solução proposta.....	17
3.2 Metodologia da experiência.....	18
3.3 Desafios, limitações e considerações éticas.....	19
3.4 Planeamento.....	20
4. Prototipagem do artefacto	22
4.1 Planeamento e desenho da representação	22
4.2 Desenvolvimento da representação	26
4.2.1 Arquitetura do artefacto.....	27
4.2.2 Primeira fase do desenvolvimento da representação	28
4.2.3 Segunda fase do desenvolvimento da representação	32
4.3 Limitações.....	40
4.4 Preparação da experiência e recolha de dados.....	41
5. Resultados obtidos.....	43
5.1 Análise dos testes realizados.....	43
5.1.1 Primeira fase	44
5.1.2 Segunda fase	46
5.1.3 Análise geral	48

5.2 Análise qualitativa dos contributos dos participantes	49
5.3 Síntese crítica e limitações de estudo	50
6. Conclusão.....	53
6.1 Percurso e proposta desenvolvida.....	53
6.2 Validação e contributos	54
6.3 Limitações e perspetivas futuras.....	55
Referências.....	56
Anexos	59

Lista de figuras

Figura 1 - Modelo dos três ciclos de Hevner	4
Figura 2: Representação tridimensional dos dados demográficos ao longo de uma linha temporal no Living Globe.	10
Figura 3: Visualização da evolução temporal das camadas de nuvens no Google Earth.	10
Figura 4: Exemplos de visualizações de dados numa representação tridimensional utilizando a biblioteca WebGL Globe.	11
Figura 5: Visualização de incêndios no NASA Worldview com linha temporal, imagens de satélite e pontos de referência interativos.	12
Figura 6: Mapa de calor de dados no deck.gl.	13
Figura 7: Mapa de calor de dados no Mapbox GL JS.	14
Figura 8: Mapa de calor de dados no three-globe.	15
Figura 9: Plano de trabalho.	21
Figura 10: Prototipagem visual inicial do globo tridimensional.	23
Figura 11: Representação da área de informações complementares de uma mancha de óleo.	24
Figura 12: Estrutura geral da interface planeada para a representação interativa das manchas de óleo.	25
Figura 13: Prototipagem visual dos controlos do globo tridimensional.	25
Figura 14: Representação da linha temporal para exploração da evolução das manchas de óleo.	25
Figura 15: Visualização conceitual das manchas de óleo com aplicação de <i>shaders</i> .	26
Figura 16: Arquitetura do artefacto.	27
Figura 17: Visualização tridimensional do globo na primeira fase.	29
Figura 18: Visualização em pontos individuais das manchas de óleo.	30
Figura 19: Visualização em mapas de calor das manchas de óleo.	30
Figura 20: Interface da tabela de dados das manchas de óleo na primeira fase.	31
Figura 21: Interface da linha temporal na primeira fase.	32
Figura 22: Visualização em <i>convex hulls</i> das manchas de óleo.	33
Figura 23: Visualização em manchas suavizadas com gradientes visuais.	33

Figura 24: Visualização do ator e evento no globo.	34
Figura 25: Interface da tabela de dados das manchas de óleo na segunda fase.	34
Figura 26 - Interface da linha temporal com os controlos de navegação temporal na segunda fase.	35
Figura 27: Comparação dos níveis de detalhe das texturas do globo e peso total das imagens.	35
Figura 28: Visualização do ciclo de dia e noite no globo.	36
Figura 29: Visualização geral das estatísticas das manchas de óleo.	37
Figura 30: Visualização detalhada da evolução temporal de uma mancha de óleo.	37
Figura 31: Modal de upload com interface <i>drag-and-drop</i> .	38
Figura 32: Interface da visita guiada.	39
Figura 33: Interface do artefacto.	40
Figura 34 – Gráfico dos resultados médios por subescala e média na primeira fase.	45
Figura 35 - Gráfico das tarefas que suscitaram dificuldades na primeira fase.	46
Figura 36 - Gráfico dos resultados médios por subescala e média na segunda fase.	47
Figura 37 - Gráfico das tarefas que suscitaram dificuldades na segunda fase.	48

Lista de tabelas

Tabela 1: Resumo das tecnologias do artefacto.	16
Tabela 2: Respostas individuais ao questionário na primeira fase.	44
Tabela 3: Respostas individuais ao questionário na segunda fase.	47

Abreviaturas e símbolos

API	Application Programming Interface
CSR	Client-Side Rendering
CSV	Comma-separated Values
DOM	Document Object Model
DSR	Design Science Research
MVP	Minimum Viable Product
npm	Node Package Manager
GIS	Geographic Information System
GLSL	OpenGL Shading Language
PSSUQ	Post-Study System Usability Questionnaire
SSR	Server-Side Rendering
WebGL	Web Graphics Library

1. Introdução

A crescente capacidade de recolha e processamento de dados ambientais em tempo real tem incentivado o desenvolvimento de novas abordagens para a sua representação e análise. Tecnologias digitais, como visualizações tridimensionais interativas, desempenham um papel fundamental na compreensão destes fenómenos e na criação de sistemas que espelham dinâmicas do mundo real em ambientes virtuais (Batty, 2018). Entre estas abordagens, destaca-se o conceito de gémeos digitais — representações virtuais dinâmicas que replicam sistemas físicos em tempo real (Asif et al., 2022) — com aplicações relevantes nos domínios ambiental e marítimo.

No contexto da monitorização das manchas de óleo em ambientes oceânicos, a necessidade de soluções eficazes de visualização torna-se particularmente premente. A representação tridimensional destes fenómenos, aliada à capacidade de explorar a sua evolução espacial e temporal, pode constituir um contributo valioso para a análise, comunicação e gestão de eventos de poluição marinha.

A presente investigação centra-se na proposta e validação de uma solução interativa para a visualização de manchas de óleo sobre um globo tridimensional. A solução explora técnicas de renderização tridimensional em ambiente *web*, recorrendo à biblioteca Three.js e à tecnologia WebGL (Web Graphics Library), permitindo uma exploração detalhada da dispersão e dinâmica das manchas em diferentes escalas geográficas e temporais. Complementarmente, este estudo procura avaliar a eficácia da solução proposta na comunicação visual destes fenómenos, contribuindo para a reflexão sobre o papel das representações digitais na análise de dados ambientais complexos.

1.1 Contexto, enquadramento e motivação

A representação digital de fenómenos ambientais, como manchas de óleo e alterações climáticas, continua a evoluir, impulsionada pela crescente disponibilidade de dados espaciais e temporais e pelo progresso das tecnologias de visualização. Sistemas de Informação Geográfica (GIS, do inglês *Geographic Information Systems*) e modelos tridimensionais têm desempenhado um papel crucial, não apenas facilitando a análise visual de dados, mas também na criação de

Introdução

ambientes interativos que apoiam a tomada de decisão em cenários ambientais críticos (Batty, 2018).

Apesar dos avanços alcançados, persiste a necessidade de desenvolver soluções que, além de acessíveis e flexíveis, ofereçam representações visuais claras e interpretáveis. Muitas das plataformas existentes permanecem limitadas a ambientes fechados ou a *software* especializado, dificultando a integração com aplicações web e dispositivos conectados (Câmara et al., 1996; Chen et al., 2024). Para além dessas restrições, subsiste o desafio de disponibilizar ambientes interativos que suportem a exploração colaborativa de fenómenos ambientais complexos e a realização de estudos avançados, como a análise de coreografias virtuais (Schewe et al., 2021; Silva et al., 2014), integrando múltiplas camadas de dados num contexto visual partilhado. A monitorização e análise de manchas de óleo em ambientes oceânicos constitui um caso paradigmático desta necessidade. A representação tridimensional da sua evolução espacial e temporal, acessível através de plataformas web, pode oferecer um contributo relevante para a compreensão, comunicação e gestão destes fenómenos.

Esta investigação integra-se no projeto europeu ILIAD, dedicado à construção de gémeos digitais do oceano com o objetivo de apoiar a monitorização ambiental e a tomada de decisão informada. Propõe-se, assim, conceber e avaliar um artefacto de visualização tridimensional que represente, de forma interativa, a coreografia virtual da dispersão de manchas de óleo. A motivação central é a criação e materialização dessa representação, especificamente orientada para o caso de uso das manchas de óleo, validando o seu valor analítico e comunicacional.

1.2 Problema, hipótese e objetivos da investigação

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a preservação dos oceanos reforça a urgência de ferramentas interativas capazes de representar, com rigor, os impactos ambientais. A visualização das manchas de óleo ilustra bem esse desafio, exigindo a articulação de informação espacial e temporal para retratar a evolução do fenómeno, muitas vezes em tempo quase real e à escala global. Embora existam soluções consolidadas em ambiente GIS, continua a ser limitada a oferta de aplicações web imersivas que conjuguem representação tridimensional, análise temporal detalhada e partilha interativa entre utilizadores.

A hipótese central desta investigação sustenta que uma visualização tridimensional imersiva, estruturada segundo princípios de coreografia virtual, aperfeiçoa de forma significativa a representação e a compreensão das manchas de óleo em contexto oceânico. Nesta dissertação, entende-se por coreografia virtual a sincronização contínua de diversas camadas de informação como a posição, a extensão, a densidade e a evolução temporal da mancha, combinadas em tempo real para espelhar, no ambiente virtual, a dinâmica do sistema físico (Schewe et al., 2021; Silva et al., 2014). Este conceito tem vindo a ser aprofundado em contextos de formação industrial, nomeadamente através do desenvolvimento de ferramentas imersivas de autoria que permitem

Introdução

aos formadores desenhar e validar procedimentos diretamente em realidade virtual. Estas ferramentas recorrem a coreografias virtuais para representar ações e interações num nível semântico elevado, dissociado dos constrangimentos técnicos da plataforma subjacente (Cassola et al., 2022). Ao coordenar fluxos de dados heterogêneos espaciais, temporais e relacionais, espera-se produzir uma visualização coesa, precisa e intuitiva, capaz de potenciar a análise e a tomada de decisão em cenários de poluição marinha.

A partir deste enquadramento, foram formuladas três questões de investigação centrais:

- **Q1:** Como melhorar a compreensão visual dos dados?
- **Q2:** Como interpretar as coreografias virtuais?
- **Q3:** Como garantir a clareza dos dados?

Para responder a estas questões, definiram-se os seguintes objetivos operacionais:

- Conceber uma plataforma web tridimensional que integre dados de manchas de óleo em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo uma exploração visual que favoreça a compreensão dos dados (**Q1**);
- Aplicar técnicas de coreografia virtual que sincronizem múltiplas camadas de informação, assegurando coerência narrativa e interpretabilidade, para facilitar a leitura semântica dos eventos representados (**Q2**);
- Avaliar a solução desenvolvida através de testes com utilizadores, analisando a sua interatividade, clareza e utilidade para públicos técnicos e não especializados, com vista à identificação de oportunidades de melhoria (**Q3**).

1.3 Metodologia da investigação

A investigação foi estruturada segundo uma abordagem iterativa baseada nos princípios da Design Science Research (DSR) de Peffers et al. (2007). A metodologia de DSR desenvolve artefactos tecnológicos através de um ciclo composto por seis fases: identificação do problema, definição de objetivos, design e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação. Este processo foi complementado pelo modelo dos três ciclos de Hevner (2007), ilustrado na Figura 1, que integra os ciclos de rigor, *design* e relevância, assegurando a ancoragem teórica, a construção prática do artefacto e a sua avaliação em contexto real.

Introdução

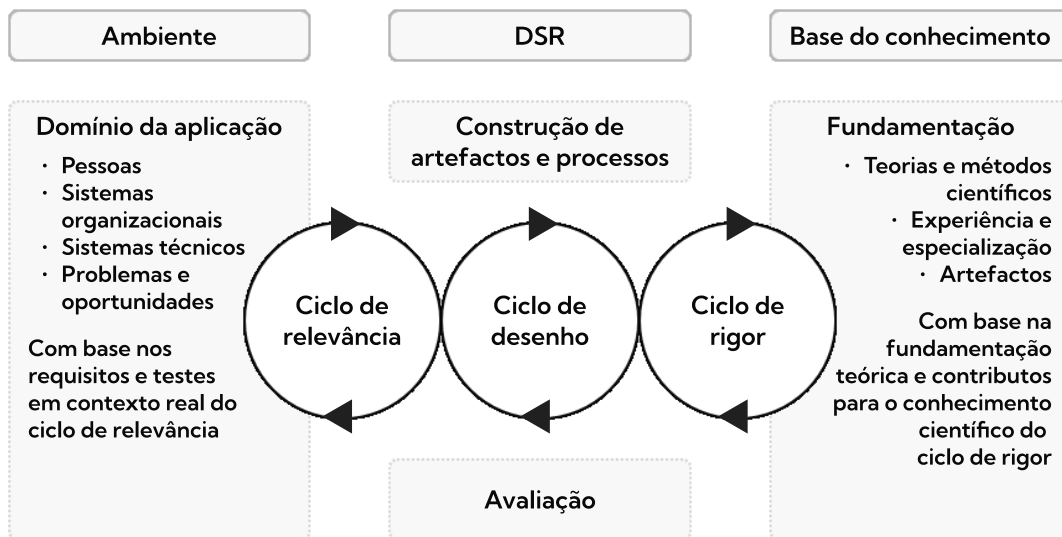


Figura 1 - Modelo dos três ciclos de Hevner

O trabalho iniciou-se com uma revisão exploratória da literatura e do estado da arte, que permitiu identificar lacunas na representação visual de manchas de óleo e estabelecer requisitos para o artefacto. Nessa fase foram igualmente analisados estudos sobre coreografias virtuais e boas práticas em processamento de dados ambientais, fornecendo a base conceptual para a fase de desenho do artefacto.

Sobre estes fundamentos concebeu-se um artefacto de interface, uma representação visual preliminar das funções centrais e da experiência do utilizador, a partir do qual se desenvolveu um protótipo inicial. Este protótipo reutilizou, como referência visual, componentes disponibilizados pelo projeto ILIAD (nomeadamente o globo), mas foi incrementado com lógica própria para integrar dados geoespaciais e ensaiar mecanismos de sincronização de camadas temporais.

Desde o início foi delineado um percurso assente em dois ciclos DSR. O primeiro contempla a construção da versão inicial do artefacto e a respetiva avaliação formativa; as recomendações resultantes orientam o segundo ciclo de desenvolvimento, sujeito a uma avaliação confirmatória. Este esquema iterativo visa produzir evidência robusta para responder às três questões de investigação definidas: de que forma se pode melhorar a compreensão visual dos dados, de que modo é possível interpretar as coreografias virtuais e como se pode assegurar a clareza dos dados representados. Ao articular desenvolvimento e avaliação em ciclos sucessivos, assegurou-se que a solução proposta responde simultaneamente aos critérios de rigor científico e às exigências operacionais do domínio aplicado.

Introdução

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, que refletem as diferentes etapas do percurso investigativo:

Introdução: apresenta o enquadramento do tema, a motivação para a investigação, os objetivos e hipóteses formuladas, bem como a metodologia adotada e a estrutura do documento.

Revisão bibliográfica: analisa os contributos teóricos mais relevantes, o estado da arte e as tecnologias associadas, como base das decisões tomadas durante o desenvolvimento da solução.

Metodologia e conceção da representação: expõe a proposta de solução, o enquadramento metodológico, os aspetos éticos e logísticos, e o planeamento.

Prototipagem do artefacto: descreve as decisões de desenho, os processos de desenvolvimento, as limitações técnicas encontradas e os procedimentos adotados para preparar a experiência de avaliação.

Resultados obtidos: apresenta os dados recolhidos durante os testes, analisando os contributos dos participantes e refletindo criticamente sobre os efeitos e limitações da solução desenvolvida.

Conclusão: sintetiza os principais contributos alcançados, reconhece as limitações do percurso seguido e identifica possibilidades concretas para investigação futura.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo procede-se a uma revisão crítica da literatura que sustenta os conceitos de interatividade, visualização de dados ambientais e representação das manchas de óleo, articulada com uma análise do estado da arte onde se discutem os estudos mais recentes, as metodologias adotadas, os resultados obtidos e as lacunas ainda existentes. Esta reflexão converge numa leitura tecnológica das principais ferramentas e bibliotecas disponíveis, justificando as opções seleccionadas para a presente investigação e situando o artefacto desenvolvido no panorama científico e tecnológico atual.

2.1 Revisão da literatura

A presente revisão adota uma abordagem exploratória, adequada à natureza interdisciplinar da investigação. O seu propósito é analisar criticamente os contributos existentes nas áreas de interatividade, visualização de dados ambientais e representação de manchas de óleo, procurando compreender como diferentes abordagens têm sido aplicadas para enfrentar os desafios inerentes a estes domínios.

A natureza exploratória desta análise permite uma abordagem flexível e aberta à identificação de novos conceitos e padrões relevantes. Para garantir uma perspetiva abrangente e rigorosa, a seleção das fontes obedeceu a critérios bem definidos. Foram privilegiados artigos académicos, estudos de caso e projetos aplicados, com especial atenção a publicações com elevado impacto e ampla referência na comunidade científica. A relevância temática foi determinante, orientando a escolha para trabalhos que exploram metodologias inovadoras na visualização interativa de dados ambientais. Igualmente, a atualidade das publicações constituiu um critério essencial, assegurando a incorporação dos avanços mais recentes na análise desenvolvida. Procurou-se ainda contemplar uma diversidade de contextos de aplicação, permitindo comparar abordagens distintas e identificar estratégias passíveis de adaptação e replicação. A fiabilidade das fontes foi garantida através da consulta de publicações científicas reconhecidas e de bases de dados de referência internacional.

A análise crítica das abordagens tecnológicas identificadas permitiu destacar tendências emergentes, bem como desafios persistentes no domínio. Foram examinadas soluções que integram tecnologias de visualização tridimensional, sistemas de informação geográfica e mecanismos de integração de dados espaciais e temporais. A avaliação dos resultados alcançados em cada estudo possibilitou uma compreensão aprofundada das vantagens e limitações das diversas metodologias, revelando lacunas que justificam a adoção de uma abordagem diferenciada nesta investigação. A síntese destas contribuições permitiu consolidar um quadro teórico robusto, que orienta as opções metodológicas e tecnológicas adotadas, assegurando que a solução proposta constitui um avanço significativo e alinhado com as necessidades do domínio em análise.

Os GIS constituem uma área interdisciplinar que articula tecnologias computacionais, ciências espaciais e práticas analíticas, com o propósito de capturar, armazenar, analisar e representar dados referenciados espacialmente. Desde a sua génese nos anos 1960, os GIS têm sido amplamente explorados em múltiplos domínios, desde o planeamento urbano à monitorização ambiental e à gestão de recursos naturais. Um GIS é concebido para integrar e processar diversas fontes de dados espaciais e geográficos, permitindo análises complexas e fundamentadas para a tomada de decisão (Burrough et al., 1986). A capacidade de gerar mapas interativos e de representar de forma clara e dinâmica fenómenos geoespaciais complexos torna os GIS ferramentas essenciais em inúmeros contextos de aplicação, incluindo a análise e visualização de eventos ambientais como os derrames de petróleo (Ahasan et al., 2022).

A evolução das tecnologias digitais trouxe um avanço significativo na forma como os dados espaciais são apresentados e explorados. A representação visual interativa em plataformas digitais tem vindo a transformar tanto a comunicação científica como a consciencialização pública, ao permitir que os utilizadores interajam diretamente com informações espaciais relevantes. Esta abordagem contribui não só para uma melhor compreensão dos fenómenos representados, como também fomenta um maior envolvimento do público com questões ambientais. Segundo Schewe et al. (2021), o conceito de coreografias virtuais oferece uma metodologia formal para a coordenação e controlo de estados em sistemas distribuídos. Esta abordagem revela-se particularmente útil em cenários que exigem elevada sincronização e previsibilidade, como nos fluxos de dados e em simulações complexas.

Adicionalmente, as coreografias orientadas a modelos multiutilizador e multidomínio demonstram o seu potencial em encenações de sistemas interativos, onde interatividade e organização são cruciais (Silva et al., 2014).

Paralelamente, a visualização tridimensional tem emergido como um pilar central na apresentação de dados espaciais. Os ambientes tridimensionais permitem representar simultaneamente grandes volumes de dados, possibilitando a identificação de padrões e correlações de forma intuitiva (Duarte et al., 2016). Elementos visuais como barras verticais proporcionais a valores numéricos ou gradientes de cor aplicados sobre mapas globais tornam os dados mais acessíveis e compreensíveis. Ferramentas interativas como rotação livre e filtros

dinâmicos ampliam ainda mais a capacidade de exploração, criando uma experiência imersiva para os utilizadores (Duarte et al., 2016). Neste contexto, os *shaders* oferecem um meio de controlo preciso sobre o processo de renderização gráfica, permitindo a implementação de técnicas avançadas como renderização volumétrica, *raytracing* e isosuperfícies (Li et al., 2019). Definidos em linguagens como GLSL (*OpenGL Shading Language*), estes mecanismos expandem as possibilidades de visualização em ambientes tridimensionais e sua utilização contribui para uma maior flexibilidade e qualidade visual na representação de fenómenos ambientais.

A usabilidade no contexto de GIS é fortemente impactada pela aplicação de princípios heurísticos. Estes princípios incluem simplicidade e diálogo natural, minimização da carga de memória do utilizador e consistência. Um *design* eficaz utiliza hierarquias visuais para guiar os utilizadores, destacando informações críticas por meio de tamanhos de fontes, contrastes de cores e alinhamento lógico. Além disso, as cores desempenham um papel essencial ao diferenciar categorias de dados e facilitar a compreensão rápida e intuitiva. Segundo Nielsen e Molich (1990), a avaliação heurística pode ser conduzida com base num conjunto reduzido de princípios, como o uso de linguagem compreensível, *feedback* claro, prevenção de erros e saídas bem definidas. Estes elementos são cruciais para criar interfaces que não apenas apresentem dados geoespaciais, mas que o façam de forma acessível e informativa, promovendo uma experiência do utilizador mais eficiente e satisfatória.

Além das capacidades gráficas, a integração de dados espaciais é essencial para avaliar impactos ambientais e desenvolver respostas eficazes. Estes dados incluem informações sobre correntes oceânicas, localização de eventos críticos, áreas afetadas e zonas de proteção ambiental. Modelar esses dados em plataformas interativas expande a capacidade de análise, permitindo antecipar cenários. A combinação de GIS com tecnologias de visualização melhora a compreensão das dinâmicas espaciais e temporais, tornando possível uma resposta mais rápida e informada em situações de emergência ambiental (Burrough et al., 1986). Por exemplo, camadas de informação como modelos digitais de terreno e simulações de dispersão de contaminantes demonstram-se cruciais para identificar padrões de impacto e propor soluções. Essa capacidade de criar simulações detalhadas é particularmente valiosa em contextos de planeamento e mitigação de desastres.

A incorporação de uma dimensão temporal ao GIS tem expandido significativamente as possibilidades de análise. Sistemas temporais permitem rastrear mudanças ao longo do tempo, respondendo a questões como “onde e quando ocorreram mudanças?” ou “qual a periodicidade de um fenómeno?” (Langran, 1992). Esta abordagem possibilita análises preditivas robustas, identificando tendências e projetando estados futuros. Ao integrar essa dimensão temporal, o GIS transforma-se numa ferramenta essencial para compreender processos dinâmicos e os fatores que influenciam as alterações espaciais. Além disso, a eficácia destes sistemas depende de um design estruturado que permita o uso colaborativo em múltiplas unidades organizacionais. A interoperabilidade entre dados e a redução de redundâncias são elementos centrais, tal como a

flexibilidade para adaptar o sistema às necessidades específicas dos utilizadores (Harmon & Anderson, 2003). Este equilíbrio entre padronização e adaptabilidade assegura que o GIS continue a oferecer suporte tanto para análises complexas como para a criação de produtos visuais de fácil interpretação.

Por fim, a evolução contínua do GIS e o seu cruzamento com novas tecnologias demonstram a importância de soluções interativas acessíveis e eficazes. Estas ferramentas não só promovem uma melhor compreensão dos fenómenos espaciais, mas também ajudam a democratizar o acesso à informação, fortalecendo a capacidade de resposta a desafios contemporâneos.

2.2 Estado da arte

A análise de trabalhos relacionados constitui um elemento essencial para compreender as abordagens existentes na representação e visualização de dados espaciais e temporais, particularmente no domínio ambiental. Ao longo dos últimos anos, diversos projetos foram desenvolvidos com características diferenciadas, contribuindo para o avanço do estado da arte e oferecendo referências conceituais e técnicas relevantes para a presente investigação.

O Living Globe (Duarte et al., 2016) distingue-se pela sua capacidade de representar visualmente dados demográficos de forma interativa. A plataforma permite a visualização de informação agregada por país, com possibilidade de configuração de intervalos de valores para uma análise visual mais detalhada. A utilização de elementos gráficos, como barras verticais e gradientes de cor, proporciona ao utilizador a flexibilidade de selecionar as métricas a representar, bem como os esquemas cromáticos mais adequados à análise pretendida. Um dos componentes mais relevantes é a integração de uma linha temporal interativa, que possibilita a observação da evolução dos dados ao longo do tempo, facilitando a interpretação dinâmica das variações demográficas. A visualização ilustrada na Figura 2 apresenta a evolução da taxa de natalidade (representada por camadas cromáticas — verde para valores baixos, vermelho para valores elevados) e da taxa de mortalidade (representada por barras verticais — no período compreendido entre 1960 e 2010, em intervalos decenais).

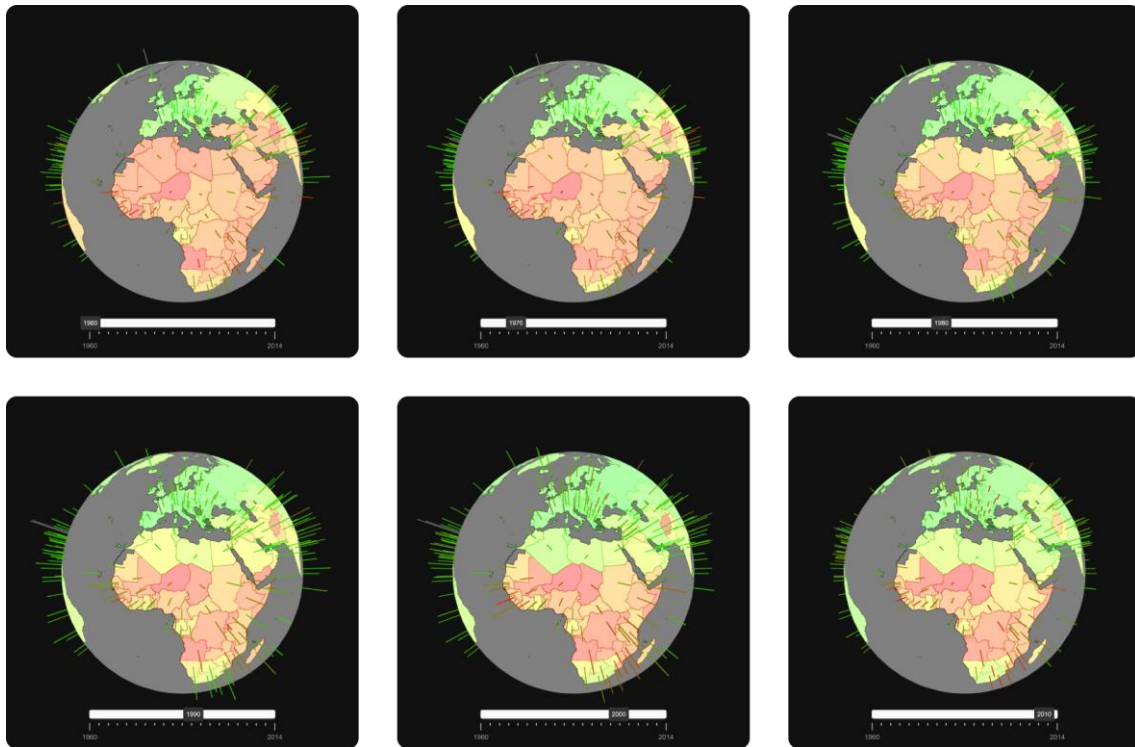


Figura 2: Representação tridimensional dos dados demográficos ao longo de uma linha temporal no Living Globe.

O Google Earth constitui uma plataforma amplamente reconhecida no domínio da visualização geoespacial, oferecendo uma representação detalhada do planeta através da integração de imagens de satélite de alta resolução. Entre as suas funcionalidades destaca-se a possibilidade de aplicação de filtragem temporal, que permite explorar séries históricas de imagens e analisar alterações espaciais ao longo do tempo. A plataforma disponibiliza ainda a sobreposição de camadas dinâmicas, como as relativas à cobertura de nuvens mais recente (Figura 3), bem como um sistema de pesquisa avançado que facilita a identificação e localização de pontos de interesse em qualquer região do planeta (Google Earth, 2025).

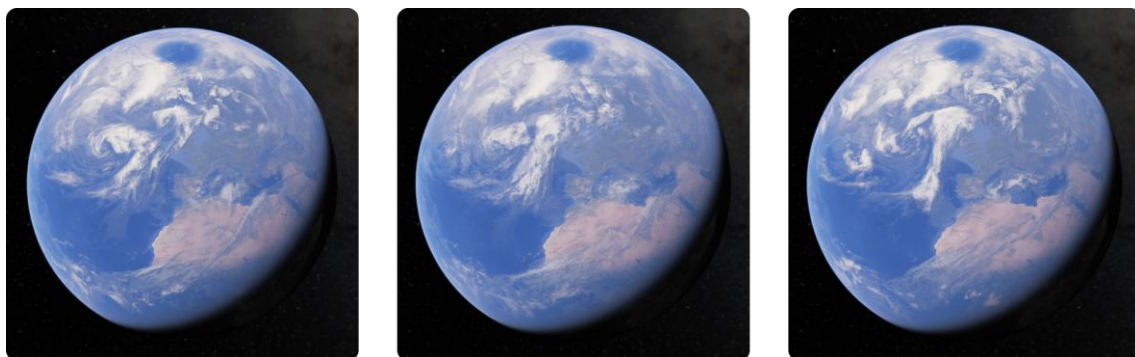


Figura 3: Visualização da evolução temporal das camadas de nuvens no Google Earth.

O WebGL Globe, disponibilizado no âmbito do Experiments with Google, reúne um conjunto de demonstrações desenvolvidas com base em visualizações tridimensionais interativas (Figura 4). Nestes exemplos, os dados são frequentemente representados por barras verticais tridimensionais, permitindo uma leitura comparativa clara de informações de caráter geográfico e estatístico. Estas visualizações evidenciam-se pela sua simplicidade conceptual e pela eficácia na comunicação visual de padrões globais (Google Experiments, n.d.).

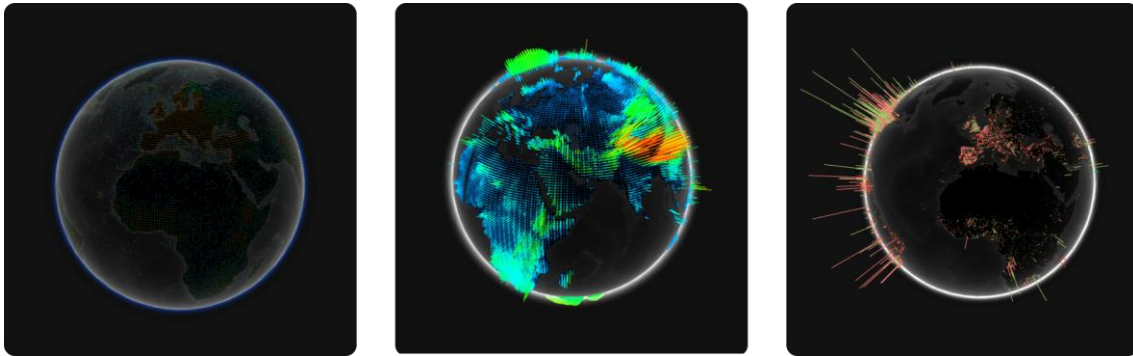


Figura 4: Exemplos de visualizações de dados numa representação tridimensional utilizando a biblioteca WebGL Globe.

O NASA Worldview constitui uma plataforma de visualização bidimensional que, embora não recorra a representações tridimensionais, oferece uma abordagem diferenciada ao permitir a exploração de eventos históricos com base em imagens de satélite e pontos de referência geoespaciais (Figura 5). Esta ferramenta revela-se particularmente valiosa para a análise de fenómenos ambientais passados, proporcionando uma base visual rica e contextualizada que apoia a investigação e a comunicação científica (NASA Worldview, 2025).

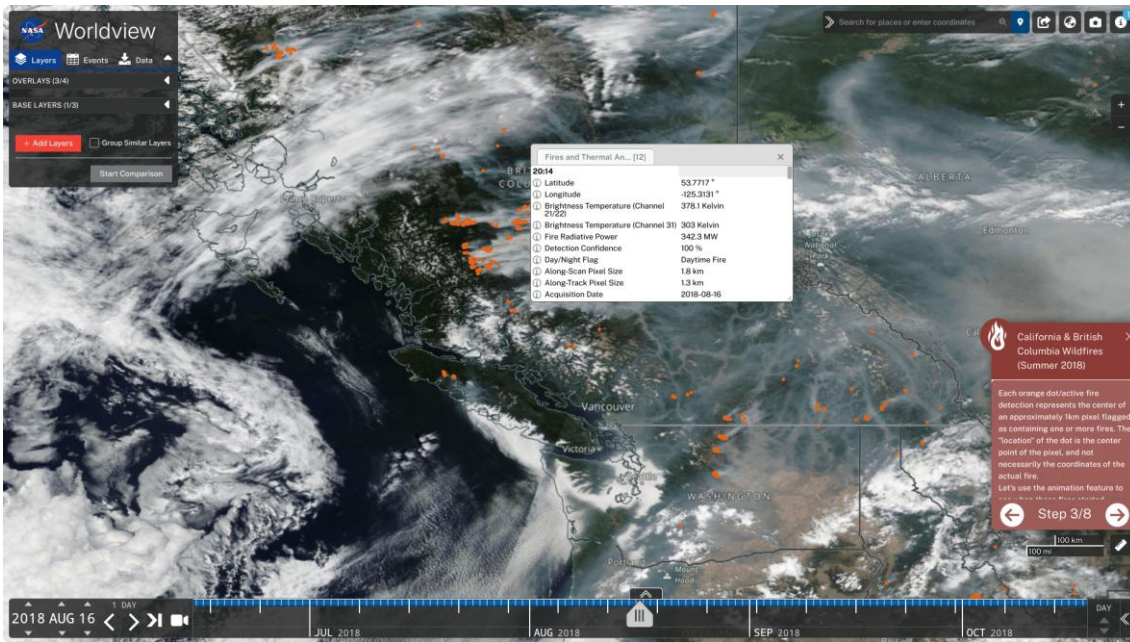


Figura 5: Visualização de incêndios no NASA Worldview com linha temporal, imagens de satélite e pontos de referência interativos.

A análise dos trabalhos relacionados evidencia um conjunto de estratégias conceituais e operacionais que informam e sustentam a concepção da solução proposta nesta investigação. A utilização de linhas temporais interativas (Duarte et al., 2016; NASA Worldview, 2025) comprova o valor de mecanismos que permitem acompanhar a evolução dinâmica de fenômenos complexos, aspecto particularmente relevante na representação de processos ambientais em mudança contínua. As representações tridimensionais, por seu lado, demonstram o potencial expressivo de elementos visuais como barras verticais e camadas cromáticas para tornar acessível a leitura de padrões espaciais e temporais (Google Experiments, n.d.). Particular relevância assume a exploração de eventos históricos, que sublinha a importância de contextualizar os dados com informações de suporte, como imagens de satélite, e a utilização de pontos de referência interativos, cuja simbologia e codificação cromática facilitam a identificação das localidades envolvidas e a interpretação imediata do seu significado no contexto dos fenômenos analisados (Google Earth, 2025; NASA Worldview, 2025).

Todavia, com base na análise crítica realizada durante a revisão bibliográfica, as soluções analisadas apresentam limitações estruturais que dificultam a sua adoção em cenários de utilização mais exigentes. Entre os constrangimentos identificados salientam-se as interfaces fragmentadas e pouco intuitivas, processos de exploração dos dados nem sempre fluidos e, em muitos casos, uma integração pouco coesa entre componentes visuais e funcionais. Estas limitações comprometem não apenas a eficácia analítica das plataformas, mas também a sua acessibilidade a públicos não especializados, um aspecto crítico quando se trata de ferramentas destinadas a apoiar a monitorização e a gestão de fenômenos ambientais.

Face a este panorama, a abordagem adotada na presente dissertação procura precisamente superar estes constrangimentos, propondo uma solução que integre representações tridimensionais mais detalhadas e mecanismos interativos avançados, sustentados por princípios de conceção centrados no utilizador. Pretende-se, assim, não apenas colmatar lacunas identificadas no estado atual das soluções existentes, mas também contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta robusta, transparente e acessível, capaz de apoiar de forma eficaz a exploração, comunicação e interpretação de fenómenos ambientais complexos, com especial incidência no caso de estudo das manchas de óleo em ambiente oceânico.

2.3 Revisão tecnológica

A seleção das tecnologias que suportam o artefacto baseou-se nos requisitos identificados para a construção de uma solução interativa orientada à representação tridimensional de fenómenos ambientais dinâmicos. As ferramentas adotadas visaram garantir flexibilidade, desempenho e personalização, respondendo aos desafios específicos da visualização de manchas de óleo em ambiente oceânico.

No campo da visualização tridimensional, foram analisadas várias bibliotecas de referência. O deck.gl (Uber, 2025) destacou-se inicialmente pela sua performance no processamento de grandes volumes de dados geoespaciais (Figura 6), mas revelou limitações na representação em formato de globo, nomeadamente pela falta de suporte nativo para visualizações tridimensionais personalizadas, o que levou à sua exclusão.

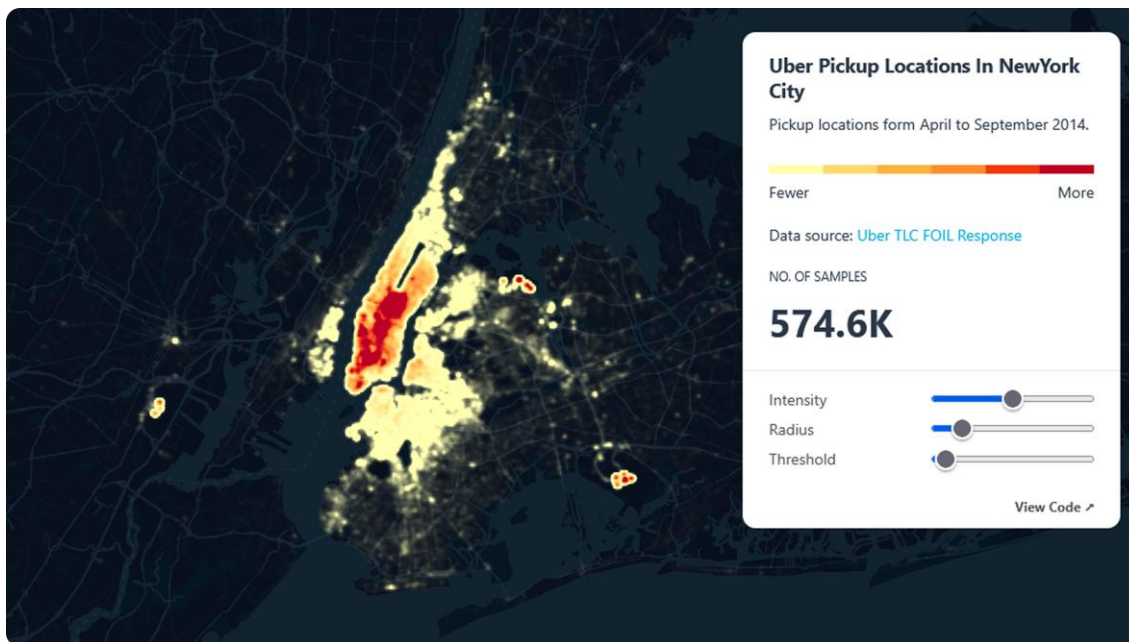


Figura 6: Mapa de calor de dados no deck.gl.

Outra solução avaliada foi o Mapbox GL JS (Mapbox, 2025), amplamente utilizado para visualizações de dados geoespaciais, incluindo suporte a representações globais em 3D e integração com camadas de mapas de calor (Figura 7). A sua facilidade de configuração inicial torna-o especialmente indicado para MVP (Produto Mínimo Viável, do inglês Minimum Viable Product). No entanto, a sua integração com a biblioteca gráfica Three.js revelou-se complexa, dificultando a personalização necessária para criar visualizações interativas altamente detalhadas. Estas limitações técnicas comprometeram a sua viabilidade para atender às exigências específicas deste projeto.

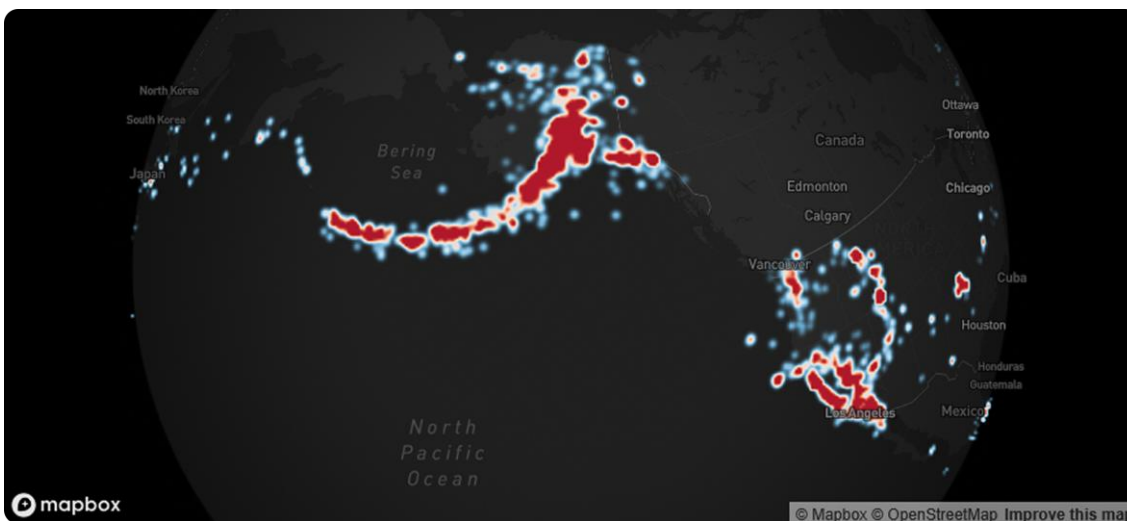


Figura 7: Mapa de calor de dados no Mapbox GL JS.

A escolha final recaiu sobre o Three.js (Three.js Foundation, 2025), uma biblioteca amplamente adotada para visualizações tridimensionais em navegadores. Esta tecnologia destaca-se pela sua versatilidade, suporte a shaders personalizados e pela capacidade de criar interações complexas. Além disso, foi complementada pelo pacote three-globe, que simplifica o desenvolvimento de globos interativos ao incorporar funcionalidades nativas para a representação de dados georreferenciados e mapas de calor (Figura 8). Este pacote oferece uma base sólida para personalizações, permitindo ajustes necessários para cumprir os requisitos específicos deste projeto, como a representação de manchas de óleo. A capacidade de incorporar heatmaps personalizados facilita não apenas a visualização intuitiva das áreas afetadas, mas também a integração de dados geoespaciais de forma clara e acessível.

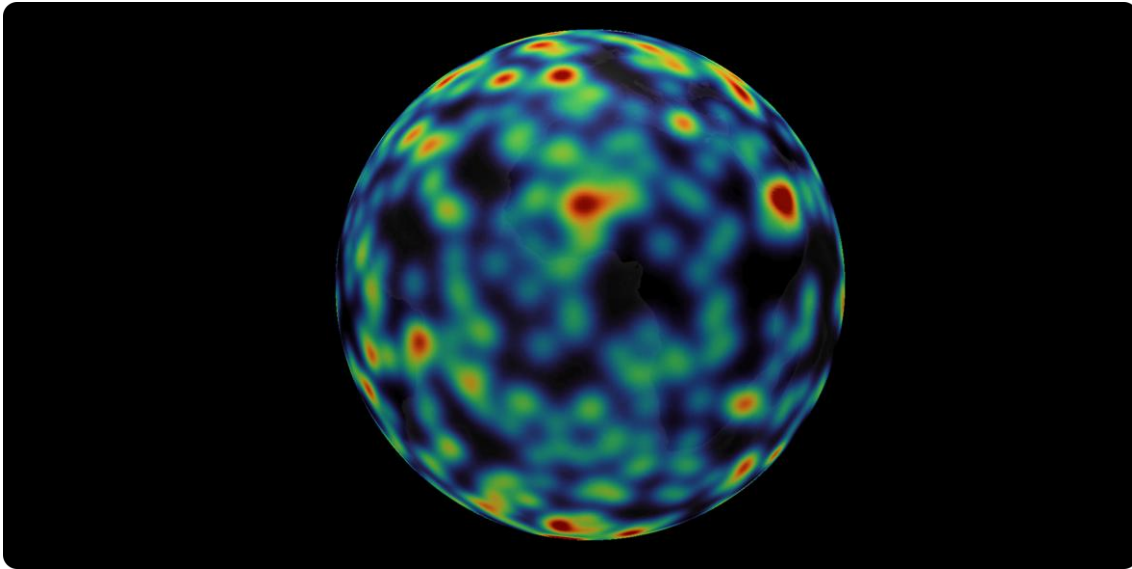


Figura 8: Mapa de calor de dados no three-globe.

Face às limitações identificadas nas abordagens previamente avaliadas, foram feitas escolhas tecnológicas específicas com o intuito de garantir desempenho, flexibilidade e qualidade visual na construção do artefacto. O artefacto foi estruturado com recurso à framework Next.js, um ambiente de desenvolvimento web com base em TypeScript e React, que facilita a criação de aplicações interativas com suporte otimizado para renderização híbrida (cliente e servidor). Esta abordagem permite otimizar o desempenho global do artefacto e simplificar a gestão eficiente de dados. A utilização de rotas dinâmicas viabiliza uma navegação fluida entre a visualização global e os detalhes associados a manchas específicas, enquanto a integração nativa de mecanismos de internacionalização (next-intl) assegura a adaptabilidade da interface a diferentes contextos linguísticos e culturais.

Para a visualização tridimensional, a biblioteca Three.js, baseada em WebGL, foi adotada como recurso principal para a renderização gráfica diretamente no navegador. Esta biblioteca foi complementada pelo pacote three-globe, que simplifica o desenvolvimento de um globo interativo, disponibilizando funcionalidades nativas para a visualização de dados georreferenciados. Com o objetivo de enriquecer a experiência visual, a utilização de shaders personalizados, desenvolvidos em GLSL, é destinada à criação de camadas visuais detalhadas, ao realce de zonas de impacto e à simulação de ciclo de dia e noite. A manipulação interativa do globo permite ainda ajustar ângulos de visualização, aplicar filtros e explorar dados específicos de forma dinâmica e intuitiva.

Numa fase inicial, os dados foram geridos localmente através de ficheiros JSON, com o propósito de validar a interface e as funcionalidades básicas do artefacto, e posteriormente com a integração com uma API (Application Programming Interface) que forneça informações atualizadas a partir da base de dados das manchas de óleo, permitindo assim a atualização contínua e dinâmica dos dados. A gestão eficiente destas requisições é assegurada pela framework, que integra as informações de forma ágil e responsiva.

No que respeita ao design e à interface, a biblioteca Tailwind CSS, reconhecida pela sua flexibilidade e eficiência na criação de interfaces modernas e responsivas, foi complementada com a biblioteca shadcn, que permite a utilização de componentes visuais pré-construídos, garantindo consistência visual e agilizando o desenvolvimento da interface, assegurando uma experiência de utilizador agradável e alinhada com os padrões atuais de design.

Por fim, a gestão de dependências e bibliotecas adicionais é suportada pelo npm (Node Package Manager), ferramenta que facilita a instalação e atualização de pacotes, certificando a modularidade e a flexibilidade necessária para a evolução contínua do artefacto.

A tabela seguinte resume as principais tecnologias, bem como as respetivas funções e o papel que desempenham no desenvolvimento da solução:

Tabela 1: Resumo das tecnologias do artefacto.

Tecnologia	Descrição e função
Next.js	<i>Framework</i> para o desenvolvimento da aplicação web, combinando renderização híbrida (cliente e servidor), gestão de rotas dinâmicas e otimização de desempenho.
next-intl	Biblioteca de suporte à internacionalização (i18n), permitindo a adaptação da interface a múltiplos contextos linguísticos e culturais.
Three.js	Biblioteca para renderização tridimensional interativa no navegador, baseada em WebGL.
three-globe	Simplificação da criação de globos interativos.
GLSL	Linguagem para a criação de <i>shaders</i> personalizados, utilizada para enriquecer as camadas visuais e a simulação de fenómenos visuais no globo.
JSON	Formato de dados utilizado na fase inicial para armazenamento local e validação das funcionalidades do artefacto.
Tailwind CSS	Biblioteca de utilitários CSS para a construção de interfaces modernas, responsivas e consistentes.
shadcn	Conjunto de componentes de interface reutilizáveis, facilitando a construção de uma interface coerente e eficiente.
npm	Sistema de gestão de dependências que suporta a instalação, manutenção e atualização das bibliotecas utilizadas no artefacto.

3. Metodologia e concepção da representação

A presente dissertação explora a concepção de soluções para a representação tridimensional interativa de fenómenos ambientais complexos, com particular foco na visualização de manchas de óleo em ambiente marítimo. A análise realizada evidenciou a escassez de ferramentas que aliem uma integração eficaz de dados espaciais e temporais com uma experiência de exploração acessível e centrada no utilizador. Este capítulo descreve a solução proposta, a metodologia da experiência adotada (segundo o DSR), os principais desafios e limitações previstos, e o planeamento que orientou o percurso da investigação. Pretende-se, deste modo, contribuir para o avanço das práticas de visualização interativa no domínio da análise de fenómenos ambientais dinâmicos.

3.1 Solução proposta

A solução concebida visa representar, de forma tridimensional e interativa a evolução de manchas de óleo em meio oceânico, integrando múltiplas dimensões do fenómeno como a localização, a extensão, a densidade e a variação temporal, numa visualização coerente, acessível e explorável. Esta proposta surge da constatação de uma lacuna nas abordagens existentes, nomeadamente a escassez de ferramentas que articulem eficazmente espacialidade e temporalidade, mantendo simultaneamente clareza visual, coerência narrativa e autonomia de exploração por parte do utilizador.

A representação é organizada segundo os princípios de uma coreografia virtual, entendida como a sincronização contínua de diferentes camadas de informação ao longo do tempo. Esta abordagem permite observar as manchas de forma contextualizada, analisando a sua progressão, a dispersão geográfica e a sobreposição com eventos correlacionados, promovendo uma leitura comparativa e dinâmica.

No centro desta proposta encontra-se o utilizador. A interação com o artefacto é concebida para ser fluida, intuitiva e informativamente rica, independentemente do nível de literacia técnica. A solução procura responder a públicos diversos, desde especialistas na monitorização ambiental a utilizadores generalistas, assegurando que a visualização não se limite a expor dados, mas apoie a sua interpretação e reflexão crítica.

Com base nesta visão, foram definidos os seguintes requisitos, que orientam a concepção do artefacto:

Requisitos funcionais:

- Representação tridimensional de manchas de óleo georreferenciadas;
- Linha temporal interativa, que permita observar a evolução dos dados;
- Capacidade de filtragem por atributos como duração, área e densidade;
- Acesso a informação contextual e detalhada sobre cada mancha de óleo;
- Possibilidade de alternar entre diferentes modos de visualização;
- Controlo direto da visualização;
- Sincronização visual baseada em coreografias virtuais.

Requisitos não funcionais:

- Clareza visual e legibilidade de todos os elementos gráficos;
- Coerência na transição entre momentos e estabilidade da interação;
- Adaptação fluida a diferentes escalas espaciais e temporais;
- Estrutura modular, facilitando a extensibilidade e manutenção futura.

O modelo conceptual adotado pressupõe, ainda, uma separação clara entre os dados, a lógica visual e os mecanismos de interação. Esta divisão visa garantir a flexibilidade da solução, permitindo a sua adaptação a diferentes domínios ou conjuntos de dados sem comprometer a estrutura base.

3.2 Metodologia da experiência

Na metodologia aplicada na dissertação, a demonstração e avaliação do artefacto constituíram fases essenciais para validar a sua utilidade, eficácia e adequação ao contexto de aplicação (Peffer et al., 2007). Estas atividades correspondem às fases de demonstração e avaliação do processo metodológico da DSR (Peffer et al., 2007), em que se procura demonstrar que o artefacto satisfaz os objetivos definidos e avaliar em que medida contribui efetivamente para a resolução do problema identificado. Além disso, o modelo dos três ciclos da DSR — que integra rigor, relevância e design — assegurou que a solução proposta estivesse fundamentada em conhecimento teórico sólido e direccionada para responder a problemas práticos de relevância (Hevner, 2007). Neste enquadramento, a experiência empírica foi planeada em dois ciclos iterativos, concebidos para recolher evidência prática sobre a solução proposta e orientar a sua evolução.

Desde o início, foi definido um percurso em dois momentos sucessivos. O primeiro ciclo da DSR contemplou a construção de uma versão inicial do artefacto com as funcionalidades centrais, incluindo a visualização das manchas de óleo no globo, a interação com a linha temporal e a filtragem dos dados disponíveis. Esta versão foi sujeita a avaliação por um grupo de utilizadores com experiência no domínio da monitorização ambiental e na análise de fenómenos espaciais. Esta avaliação visou recolher recomendações sobre aspectos como a clareza da representação, a eficácia da interação e a utilidade analítica da plataforma. Para o efeito, foi utilizado um protocolo que incluiu um conjunto de tarefas guiadas, a aplicação do questionário PSSUQ, a identificação das tarefas que suscitaram dificuldades e a recolha de respostas abertas sobre aspectos que os utilizadores consideraram prioritários para melhoria.

Com base nos resultados do primeiro ciclo, procedeu-se a um segundo momento de desenvolvimento, onde se introduziram refinamentos na interface, otimizações no desempenho e o alargamento das funcionalidades de exploração visual. A versão revista foi então submetida a uma segunda fase de avaliação, desta vez envolvendo um conjunto de utilizadores sem experiência prévia na plataforma nem no domínio específico da análise de manchas de óleo. O objetivo desta segunda avaliação foi a validação da acessibilidade, da usabilidade e da clareza da solução junto de públicos não especializados, assegurando que a ferramenta pudesse responder a um leque mais amplo de necessidades de exploração e comunicação, sem que este segundo ciclo implicasse alterações no paradigma central da representação das manchas de óleo enquanto coreografias virtuais.

A metodologia da experiência foi assim concebida para garantir que a avaliação do artefacto se ancorasse em contextos de utilização representativos, permitindo aferir em que medida a solução proposta poderia efetivamente contribuir para superar as limitações identificadas no panorama atual das ferramentas de visualização ambiental. Os resultados recolhidos em ambas as fases foram analisados de forma integrada, apoiando não apenas as iterações de desenvolvimento, mas também as conclusões da investigação quanto à adequação e ao potencial da abordagem adoptada.

3.3 Desafios, limitações e considerações éticas

A conceção da experiência planeada apresenta diversos desafios expectáveis. Um dos principais desafios previstos é garantir um desempenho eficiente na renderização gráfica e na manipulação de grandes volumes de dados geoespaciais, assegurando uma interação fluida em diferentes dispositivos e contextos de utilização. Está também prevista a exploração do uso de *shaders* personalizados, com o objetivo de enriquecer as camadas visuais e reforçar a expressividade gráfica do artefacto. Contudo, reconhece-se que a integração destas técnicas poderá implicar desafios adicionais em termos de desempenho e compatibilidade.

A integração de APIs para acesso a dados em tempo real coloca igualmente questões de complexidade, tanto ao nível da arquitetura de dados como da consistência e fiabilidade da informação apresentada, sendo igualmente prioritário garantir uma experiência de utilização coerente e responsiva em dispositivos com diferentes capacidades. As limitações metodológicas e tecnológicas previstas serão monitorizadas ao longo do processo iterativo e das fases de avaliação da experiência, permitindo ajustar as opções adotadas sempre que se revele necessário, de forma a garantir que a solução final respeita os objetivos estabelecidos.

Em paralelo, serão observadas considerações éticas fundamentais. A privacidade dos dados utilizados será assegurada, bem como a representação precisa e não enviesada da informação visualizada. Durante os testes de usabilidade, será garantido o consentimento informado dos participantes, respeitando os princípios de transparência e responsabilidade e assegurando que os resultados obtidos contribuam para uma avaliação ética e cientificamente válida da solução proposta.

3.4 Planeamento

O planeamento temporal da investigação segue uma abordagem estruturada e iterativa, em conformidade com os princípios do DSR, que articulam o rigor científico com a prática de conceção. O cronograma é concebido para integrar de forma equilibrada as diferentes etapas do percurso investigativo, nomeadamente a revisão do estado da arte, a definição da solução proposta, a implementação do artefacto e a sua avaliação empírica junto de utilizadores.

As atividades são distribuídas por ciclos iterativos, permitindo validar progressivamente as decisões tomadas e incorporar, de forma sistemática, o feedback recolhido durante o processo. A Figura 9 apresenta o plano de trabalho definido após a consolidação dos fundamentos teóricos e conceptuais da investigação:

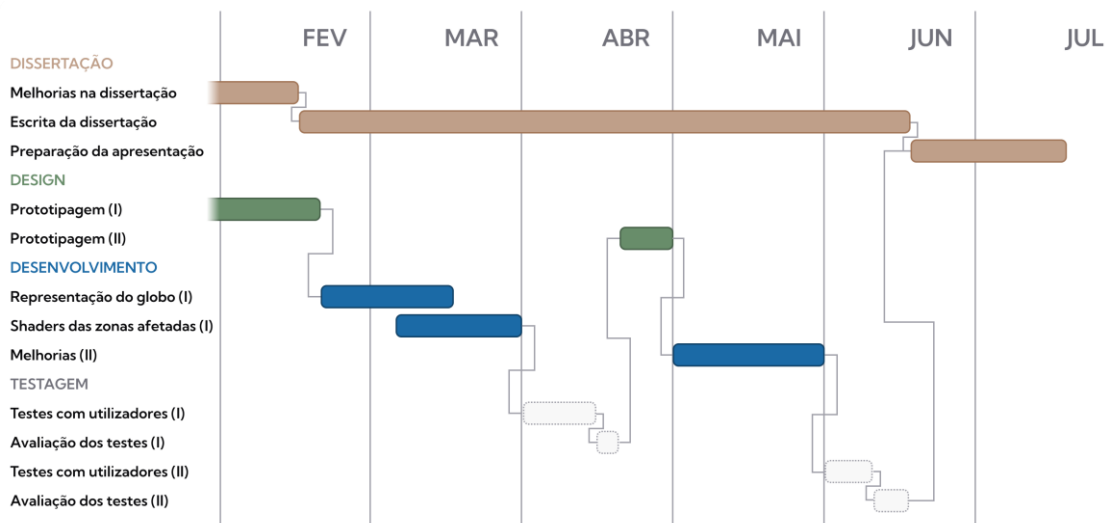


Figura 9: Plano de trabalho.

A redação da dissertação acompanha todas as fases do trabalho, sendo conduzida de forma transversal e progressiva, de modo a refletir a evolução do artefacto e a integrar, em tempo útil, os resultados obtidos. Os capítulos metodológicos e de revisão teórica são desenvolvidos em paralelo com as fases iniciais de conceção, assegurando uma fundamentação coerente das opções adotadas.

A fase inicial do processo centra-se na prototipagem das funcionalidades essenciais, nomeadamente a representação das manchas de óleo em globo tridimensional, a interação com a linha temporal e os mecanismos de filtragem. Esta versão preliminar é sujeita a uma primeira ronda de avaliação empírica com utilizadores experientes na área da monitorização ambiental, procurando validar o propósito da solução enquanto representação de coreografias virtuais e aferir a adequação da abordagem visual às necessidades do domínio.

Prevê-se, em seguida, uma segunda fase de avaliação, focada na experiência de utilização e na clareza da interface. Esta etapa envolve utilizadores sem experiência prévia no sistema, com o objetivo de avaliar a usabilidade, a acessibilidade e a robustez comunicativa da solução junto de públicos generalistas.

A análise cruzada das observações recolhidas em ambos os ciclos de avaliação permitirá consolidar as conclusões da investigação e refletir criticamente sobre o posicionamento da proposta no contexto atual da visualização interativa de fenómenos ambientais.

4. Prototipagem do artefacto

Este capítulo apresenta de forma sistemática as decisões de conceção que orientaram o desenho e desenvolvimento do artefacto, bem como a arquitetura resultante, as funcionalidades implementadas e os constrangimentos identificados ao longo do processo. Enquadra-se nas fases de desenho, desenvolvimento e demonstração previstas na metodologia DSR, assegurando a articulação entre os requisitos identificados nas fases anteriores e a materialização técnica da solução proposta. Por fim, descreve-se o planeamento da experiência de avaliação, concebida com o objetivo de recolher evidência empírica quanto à utilidade, usabilidade e adequação do artefacto à análise de fenómenos ambientais dinâmicos.

4.1 Planeamento e desenho da representação

A conceção inicial da representação visual do artefacto foi orientada pelos princípios identificados na revisão de literatura e na análise do estado da arte. Estas referências permitiram reconhecer abordagens eficazes na visualização de fenómenos espaciais e temporais, bem como limitações persistentes ao nível da usabilidade e da clareza interpretativa. Com base nessas evidências, foi delineada, de forma iterativa, a estrutura funcional e hierárquica do artefacto, tendo em vista a criação de uma solução coerente com os objetivos definidos. Dado que o artefacto se insere numa plataforma interativa mais ampla, a conceção procurou ir além da mera representação gráfica das manchas de óleo enquanto coreografias virtuais, assegurando simultaneamente uma experiência de exploração informativa, fluida e centrada no utilizador.

Neste contexto, foi desenvolvida uma fase preliminar de conceção centrada na interface e na experiência visual do utilizador. Esta etapa consistiu na elaboração de artefactos conceptuais e protótipos de interface, com o objetivo de explorar diferentes estratégias de apresentação e interação. Através destes artefactos, foi possível simular, em fase de planeamento, o comportamento esperado da representação das coreografias virtuais, identificar os modos de interação mais adequados e avaliar de que forma a interface poderia contribuir para uma compreensão mais eficaz da dinâmica espacial e temporal das manchas de óleo.

Prototipagem do artefacto

A representação das manchas de óleo no globo tridimensional foi concebida como o elemento visual central da interface (Figura 10), permitindo a exploração integrada da sua evolução espacial e temporal. A escolha desta forma de visualização baseou-se na sua capacidade de evidenciar, de forma imediata, a distribuição global dos eventos, reforçando o carácter dinâmico e georreferenciado do fenómeno representado.



Figura 10: Prototipagem visual inicial do globo tridimensional.

Desde o planeamento inicial, foi estabelecido que a interface deveria disponibilizar, de forma contextual, os principais dados associados a cada mancha. A extensão, a duração, a densidade, a localização e a progressão temporal de cada evento constituíram requisitos mínimos para a componente informativa do artefacto (Figura 11). Esta decisão visou assegurar que a visualização tridimensional fosse complementada por dados analíticos relevantes, promovendo uma compreensão mais aprofundada do fenómeno.

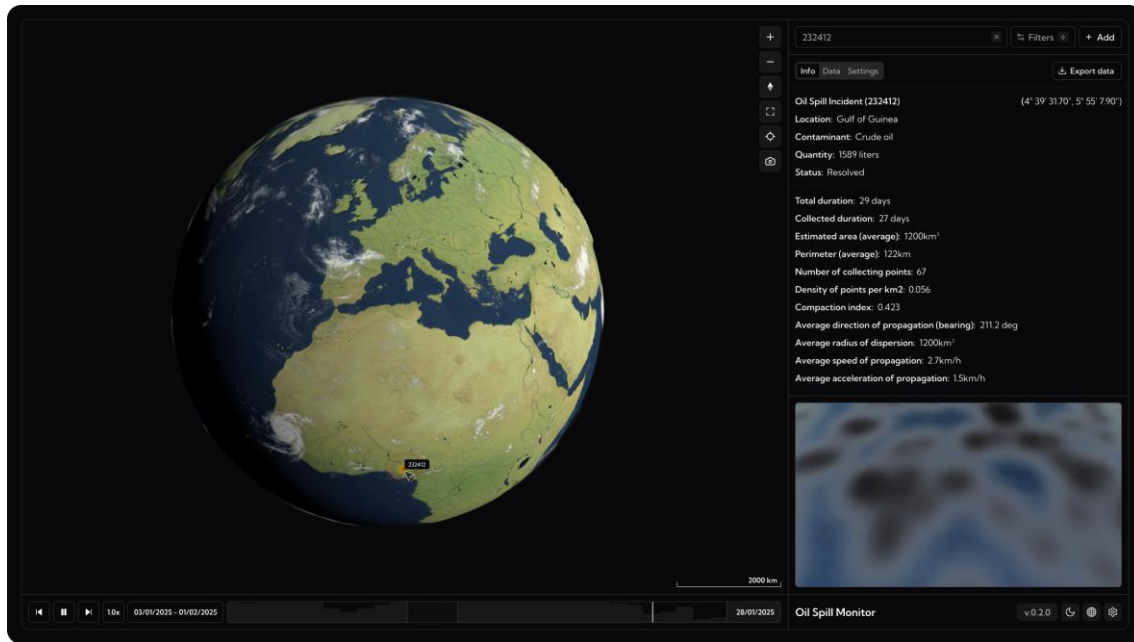


Figura 11: Representação da área de informações complementares de uma mancha de óleo.

As decisões tomadas ao nível da interface foram guiadas por três princípios fundamentais: clareza informativa, controlo pelo utilizador e coerência visual. Procurou-se garantir legibilidade imediata das representações, minimizando ambiguidades e a carga cognitiva exigida. A interação foi concebida para favorecer a autonomia do utilizador na exploração dos dados, permitindo-lhe ajustar parâmetros visuais e temporais de forma granular. A coerência visual foi assegurada pela uniformização dos elementos gráficos ao longo de toda a interface (Figura 12).

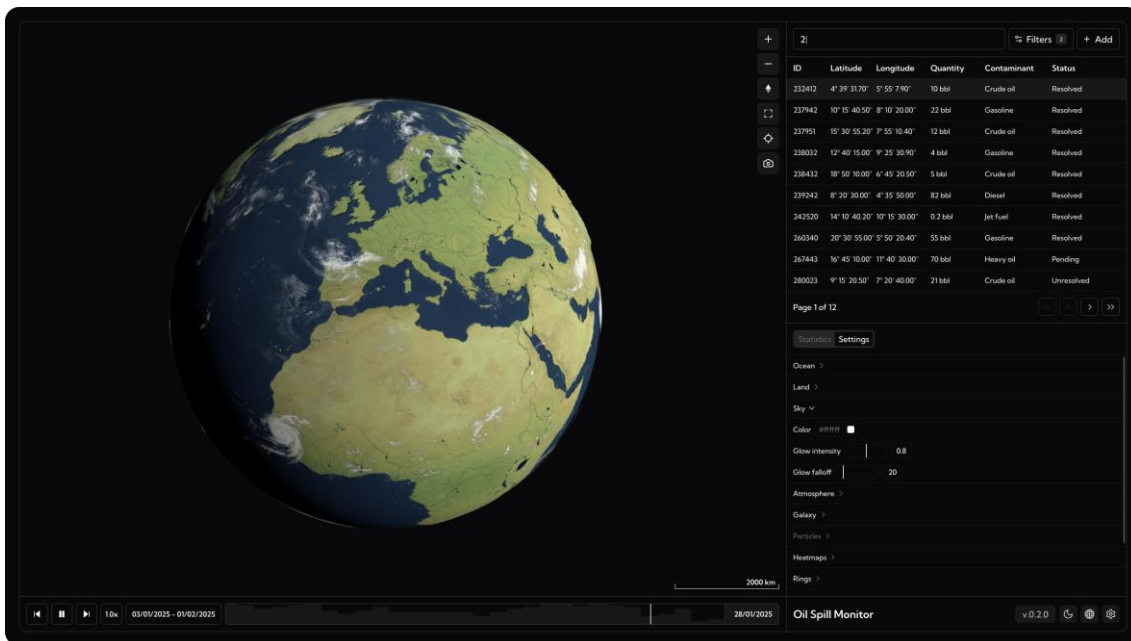


Figura 12: Estrutura geral da interface planeada para a representação interativa das manchas de óleo.

Para suportar esta interação, foram desenvolvidos controlos específicos para a manipulação do globo (Figura 13), incluindo rotação livre, zoom progressivo e reposicionamento automático. Estes mecanismos garantem acessibilidade a qualquer região do planeta, facilitando a análise localizada dos eventos.

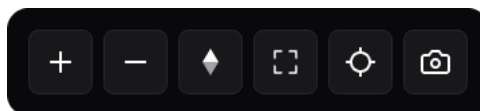


Figura 13: Prototipagem visual dos controlos do globo tridimensional.

A linha temporal foi concebida como um componente essencial da coreografia virtual, assegurando a exploração coerente da dimensão temporal dos dados. Este controlo permite navegar entre momentos específicos, ajustar a granularidade da visualização e sincronizar automaticamente a representação no globo com o instante selecionado, evidenciando a articulação entre tempo e espaço como eixo estruturante da experiência interativa (Figura 14).



Figura 14: Representação da linha temporal para exploração da evolução das manchas de óleo.

A representação das manchas recorreu ao uso de *shaders* personalizados, com o objetivo de reforçar a expressividade visual e a legibilidade da informação. Estes efeitos permitem simular gradientes de densidade, transições suaves e variações de iluminação em função do tempo e da dispersão dos dados (Figura 15).

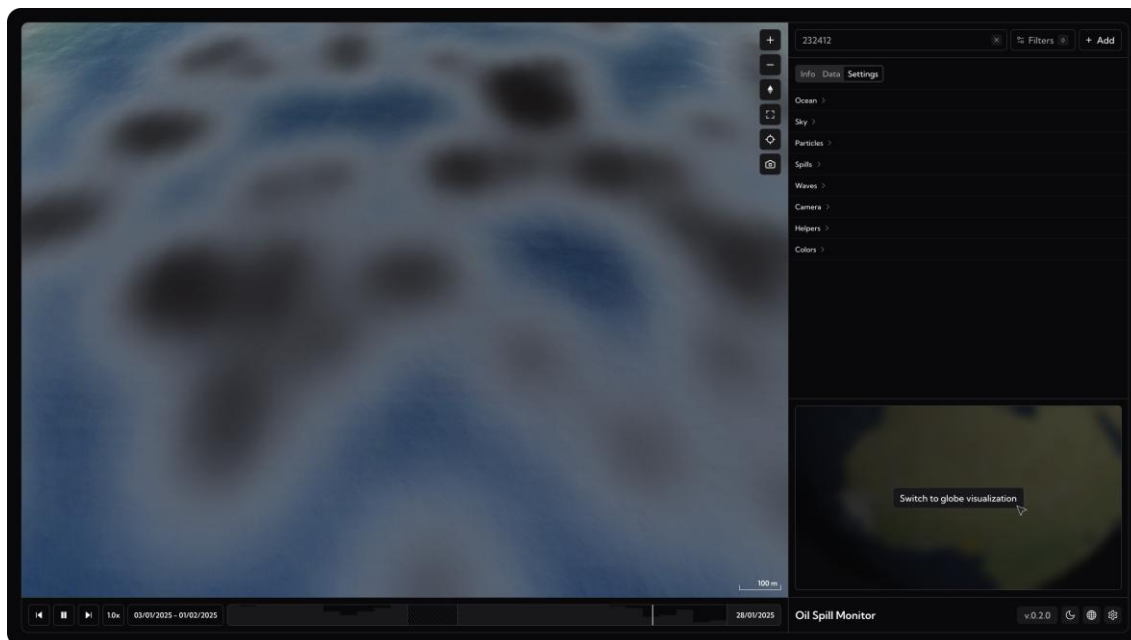


Figura 15: Visualização conceitual das manchas de óleo com aplicação de *shaders*.

No contexto da representação coreográfica adotada, cada mancha de óleo pode ser associada a um ou mais atores, entendido como a entidade responsável pela sua ocorrência, deteção ou monitorização. Esta associação tem como objetivo enriquecer a visualização com uma dimensão interpretativa adicional, permitindo ao utilizador não apenas observar a evolução geoespacial e temporal do fenómeno, mas também compreender as relações entre agentes e eventos. Trata-se, assim, de uma camada semântica que reforça a narrativa subjacente às coreografias virtuais, promovendo uma leitura mais completa e contextualizada.

Embora este conceito tenha sido integrado no desenho conceptual desde as fases iniciais, a sua representação visual não foi contemplada nos protótipos desta etapa, devido a limitações nas ferramentas utilizadas. No entanto, a visualização dos atores foi concretizada posteriormente durante o desenvolvimento funcional do artefacto, sendo apresentada na secção seguinte.

4.2 Desenvolvimento da representação

Esta secção descreve a evolução do desenvolvimento técnico do artefacto, estruturada em três momentos distintos: a definição da arquitetura base, a primeira fase de implementação

funcional e, por fim, uma segunda fase de desenvolvimento orientada pelas observações recolhidas durante os testes da primeira fase. Esta progressão reflete os ciclos iterativos da abordagem DSR, garantindo o alinhamento entre conceção, execução e validação.

4.2.1 Arquitetura do artefacto

Com base nos protótipos e definições conceptuais estabelecidos na fase anterior, iniciou-se o desenvolvimento técnico do artefacto, centrado na criação de uma arquitetura robusta, modular e alinhada com os objetivos da investigação. As decisões de implementação foram sustentadas por uma base conceptual consolidada, resultante da revisão de literatura e da análise do estado da arte, bem como pelos requisitos identificados no contexto específico da monitorização ambiental de manchas de óleo.

A arquitetura desenvolvida foi concebida para garantir uma experiência de exploração fluida, responsiva e escalável, assegurando a representação dinâmica e interativa da evolução espacial e temporal das manchas de óleo. Esta estrutura, representada na Figura 16, assenta a separação clara de responsabilidades entre camadas, com um fluxo de dados bem definido e sincronizado.

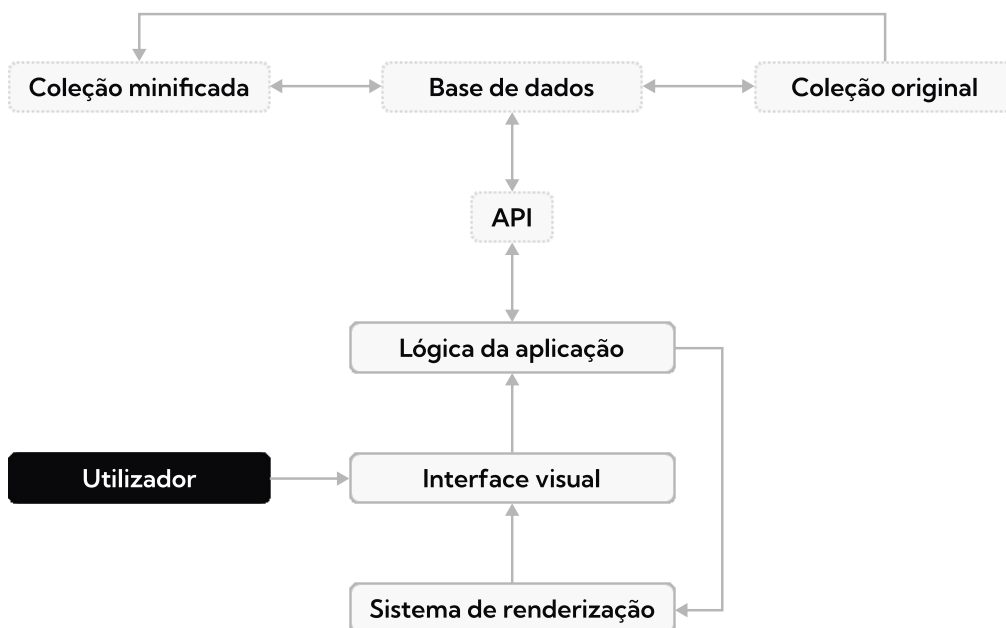


Figura 16: Arquitetura do artefacto.

No centro da interação está o utilizador, cuja experiência é mediada por uma interface visual que integra a exploração do globo tridimensional, a navegação temporal, a aplicação de filtros e o acesso a dados detalhados por meio da tabela e dos painéis estatísticos. Esta interface comunica com um sistema de renderização que reforça a expressividade visual, ao mesmo tempo que preserva o contexto analítico em cada momento de exploração.

A camada lógica do artefacto, implementada com base em contextos de estado e componentes funcionais, assegura a coerência entre os diversos elementos da interface. Esta camada gere o estado global do artefacto, incluindo a data atual, os filtros aplicados e a seleção ativa, e orquestra a comunicação com o motor de renderização e com a API de dados. Este controlo centralizado é essencial para garantir a consistência temporal e a sincronização das camadas de representação, aspetos estruturantes na modelação de coreografias virtuais.

O acesso aos dados é mediado por uma API interna, implementada através de rotas nativas da *framework* adotada. Esta camada processa os pedidos do artefacto, aplicando filtros e paginação, e serve apenas a informação necessária ao contexto atual da interface. Esta abordagem assegura uma atualização eficiente e reduz a latência, mantendo o desempenho mesmo em cenários com grandes volumes de dados.

Para otimizar a performance e a experiência do utilizador, foi adotado um modelo híbrido de renderização, combinando técnicas de *server-side rendering* (SSR) e *client-side rendering* (CSR). Este equilíbrio permite acelerar a apresentação inicial da interface, carregando rapidamente elementos não dependentes da API, e assegurar interações dinâmicas nas fases subsequentes. Esta estratégia também facilita a manutenção do contexto visual ao longo do tempo, reduzindo latências perceptíveis.

A arquitetura suporta ainda mecanismos de *caching* no servidor, permitindo um controlo mais eficaz sobre paginação, filtragem e sincronização com a linha temporal. Esta robustez técnica contribuiu para a introdução de funcionalidades avançadas, como a partilha de hiperligações com estados persistentes do artefacto, reforçando o seu potencial como ferramenta de comunicação e análise colaborativa.

A base de dados, organiza-se em duas coleções principais: *oilspills*, que armazena os dados completos de cada mancha, e *oilspills-min*, que contém versões otimizadas para visualização. O fluxo de dados entre ambas é automatizado por *triggers*, que asseguram a geração de representações simplificadas e o cálculo de estatísticas agregadas sempre que ocorrem inserções ou atualizações. Esta estrutura modular permite equilibrar detalhe e desempenho, viabilizando uma experiência fluida sem comprometer a integridade analítica da informação.

De forma integrada, esta arquitetura responde não só aos requisitos técnicos do domínio, como também aos objetivos definidos nesta investigação. A combinação entre flexibilidade visual, desempenho gráfico e solidez na camada de dados foi central para a concretização da representação enquanto coreografia virtual.

4.2.2 Primeira fase do desenvolvimento da representação

A primeira fase de implementação teve como base os princípios definidos na fase de conceção e a arquitetura estabelecida na etapa anterior. Esta etapa consistiu na construção da interface e das componentes interativas essenciais, com o objetivo de proporcionar uma experiência coerente, acessível e orientada para a análise de fenómenos ambientais complexos.

Prototipagem do artefacto

Os principais componentes da interface: o globo tridimensional, os modos de visualização, a tabela de dados e a linha temporal; foram articulados de forma a potenciar a exploração interativa e o envolvimento do utilizador com os fenómenos representados.

A componente tridimensional do globo (Figura 17) foi concebida como o suporte visual principal da representação proposta, constituindo o espaço de articulação das coreografias virtuais desenvolvidas. A sua seleção baseou-se na capacidade de integrar, de forma simultânea, informação geográfica e temporal, permitindo visualizar a dispersão e evolução das manchas de óleo com clareza e coerência. A interface foi otimizada para assegurar uma experiência visual fluida e responsiva, mesmo perante conjuntos de dados com elevada complexidade espacial e temporal.

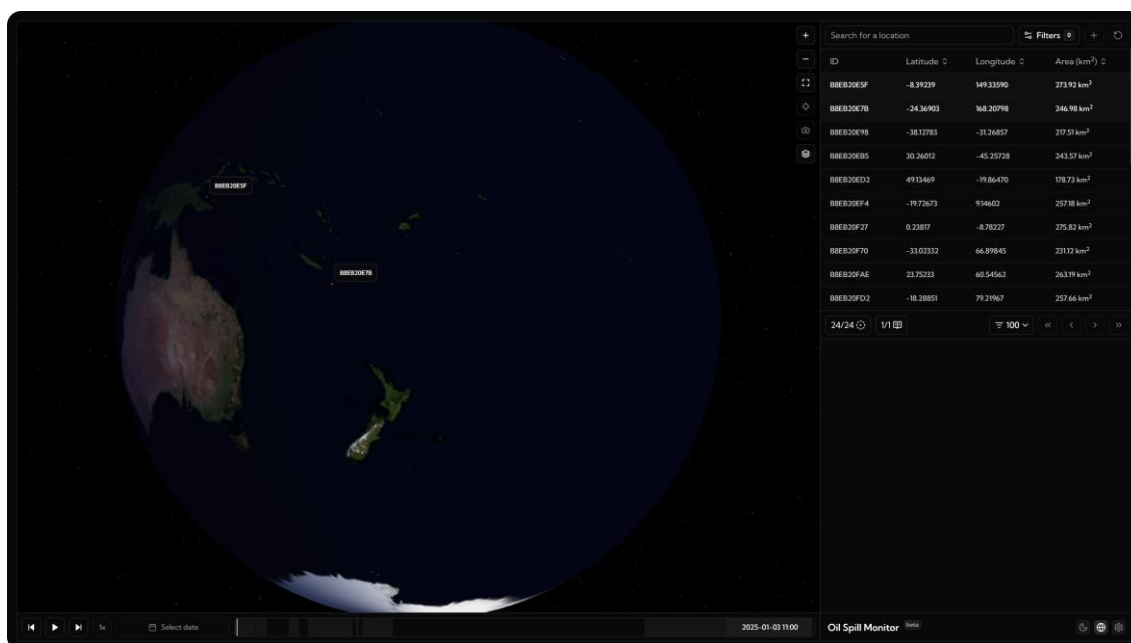


Figura 17: Visualização tridimensional do globo na primeira fase.

Para representar as manchas de óleo, foram concebidas inicialmente dois modos de visualização, cada um orientado para destacar diferentes aspetos analíticos do fenómeno. O primeiro, visualização em pontos individuais, apresenta cada coordenada geográfica registada como um marcador bidimensional no globo. A densidade associada a cada ponto determina visualmente o seu raio e a sua cor, permitindo ao utilizador identificar, de forma imediata, áreas de maior concentração, como representado na Figura 18.

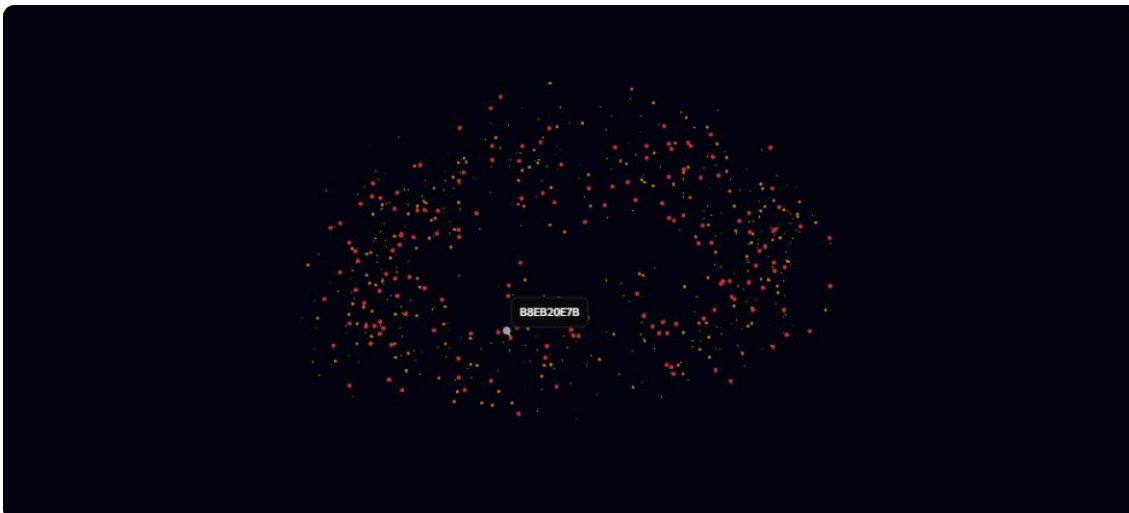


Figura 18: Visualização em pontos individuais das manchas de óleo.

O segundo modo recorre ao uso de mapas de calor (Figura 19), que, apesar de revelarem limitações significativas em termos de desempenho e qualidade gráfica sobretudo em cenários com volumes elevados de dados, permitem identificar as áreas afetadas pelo fenómeno de forma imediata.

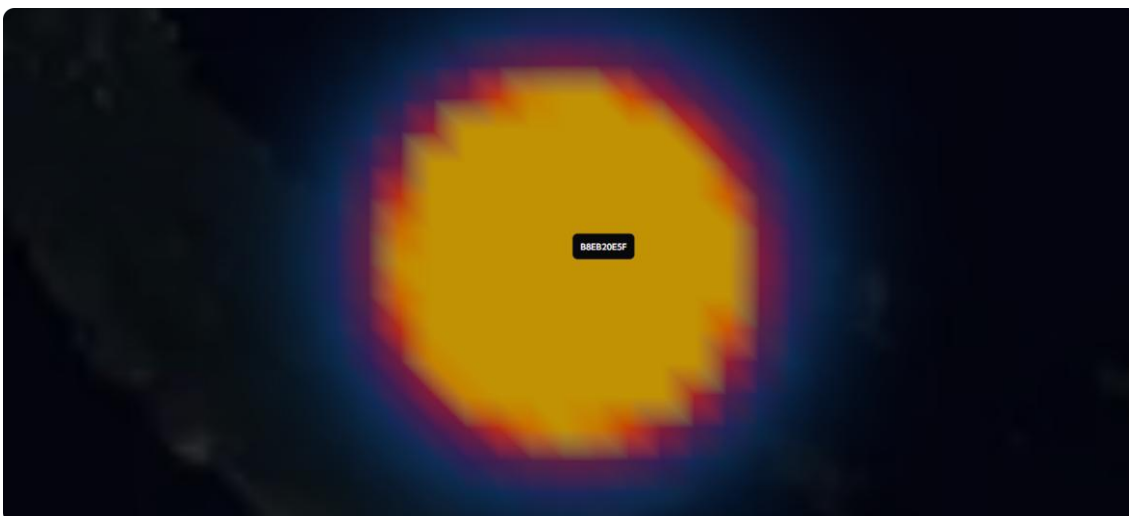


Figura 19: Visualização em mapas de calor das manchas de óleo.

A linha temporal constitui um dos elementos estruturantes da representação, ao articular de forma explícita a progressão dos eventos no tempo. Concebida como parte integrante da lógica de coreografia virtual, esta componente permite ao utilizador controlar a visualização temporal dos dados de forma granular, precisa e reativa.

Como complemento à visualização tridimensional, o artefacto inclui uma tabela interativa que organiza, de forma estruturada, os dados associados a cada mancha. Esta componente foi concebida para reforçar a legibilidade e acessibilidade da informação, permitindo uma consulta

precisa e paralela à exploração visual. Cada linha da tabela apresenta um conjunto de atributos descritivos relevantes, tais como o identificador do evento, a localização geográfica (coordenadas centrais) e a área afetada. Estes dados contribuem para contextualizar a informação espacial representada no globo e oferecem uma base sólida para análise comparativa.

A tabela foi dotada de funcionalidades avançadas de exploração, como filtros personalizados e ordenação dinâmica dos resultados (Figura 20). O utilizador pode, por exemplo, restringir a análise a manchas com determinada área. A funcionalidade de paginação garante uma navegação fluida, mesmo em contextos com grandes volumes de dados, assegurando a eficiência da interface sem comprometer a performance global do sistema.

ID	Latitu	Area range (km ²)	km ²
B8EB20E5F	-8.392	Min area - Max area	cm ²
B8EB20E7B	-24.36	Columns visibility	km ²
B8EB20E98	-38.127	Select columns	m ²
B8EB20EB5	30.26012	-45.25728	243.57 km ²
B8EB20ED2	49.13469	-19.86470	178.73 km ²
B8EB20EF4	-19.72673	9.14602	257.18 km ²
B8EB20F27	0.23817	-8.78227	275.82 km ²
B8EB20F70	-33.02332	66.89845	231.12 km ²
B8EB20FAE	23.75233	60.54562	263.19 km ²
B8EB20FD2	-18.28851	79.21967	257.66 km ²

Figura 20: Interface da tabela de dados das manchas de óleo na primeira fase.

A articulação entre a visualização tridimensional, a linha temporal e a tabela interativa permite estruturar uma experiência de exploração coerente e completa. Esta integração reforça a clareza da representação e assegura a acessibilidade da informação para diferentes perfis de utilizador, em particular no contexto da análise de fenómenos ambientais complexos.

Do ponto de vista funcional, a linha temporal (Figura 21) oferece múltiplas formas de navegação: é possível selecionar diretamente um momento específico, percorrer os eventos de forma sequencial ou ativar a reprodução automática. Estas funcionalidades visam proporcionar uma experiência de exploração contínua, promovendo a compreensão da evolução das manchas ao longo do tempo. Visualmente, a linha temporal é composta por blocos discretos que representam intervalos com dados disponíveis. Estes blocos são gerados de forma dinâmica, com base nos timestamps efetivamente registados, e comunicam ao utilizador, de forma visual, a

presença ou ausência de dados em cada período. O bloco ativo reflete o instante atualmente visualizado, enquanto lacunas nos dados são indicadas por espaçamentos, facilitando a leitura de padrões de continuidade ou interrupção.

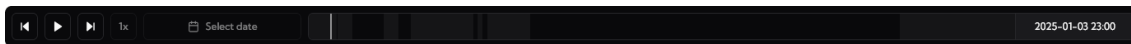


Figura 21: Interface da linha temporal na primeira fase.

Esta primeira fase permitiu consolidar uma base funcional coerente, alinhada com os objetivos centrais da investigação. A integração dos modos de visualização e da linha temporal garantiu uma articulação inicial entre espacialidade e temporalidade, essencial à lógica das coreografias virtuais. Embora limitada a um conjunto reduzido de funcionalidades, esta versão serviu como prova de conceito e base para recolher *feedback* qualitativo e orientar os desenvolvimentos subsequentes.

4.2.3 Segunda fase do desenvolvimento da representação

Na sequência da primeira fase e com base no feedback recolhido durante os testes iniciais, procedeu-se à segunda fase de desenvolvimento, centrada na consolidação da experiência visual e na expansão das funcionalidades do artefacto. Esta etapa introduziu melhorias na linha temporal, novos modos de visualização, ajustes na tabela de dados e a integração de funcionalidades complementares, como estatísticas interativas, sistema de carregamento de dados e visita guiada, com o objetivo de reforçar a expressividade analítica, a clareza interpretativa e a acessibilidade da solução.

No que respeita à representação das manchas de óleo, foram introduzidos dois novos modos de visualização que substituíram o anterior modelo baseado em mapas de calor, entretanto removido devido a limitações significativas em termos de desempenho e qualidade gráfica, sobretudo em cenários com grandes volumes de dados.

O primeiro novo modo recorre a contornos geométricos, através de polígonos convexos que envolvem os agrupamentos de pontos relativos a uma mancha num determinado instante (Figura 22). Esta estratégia facilita a leitura da extensão agregada da área afetada e da sua morfologia geral, revelando padrões espaciais que podem ser menos evidentes na representação pontual.

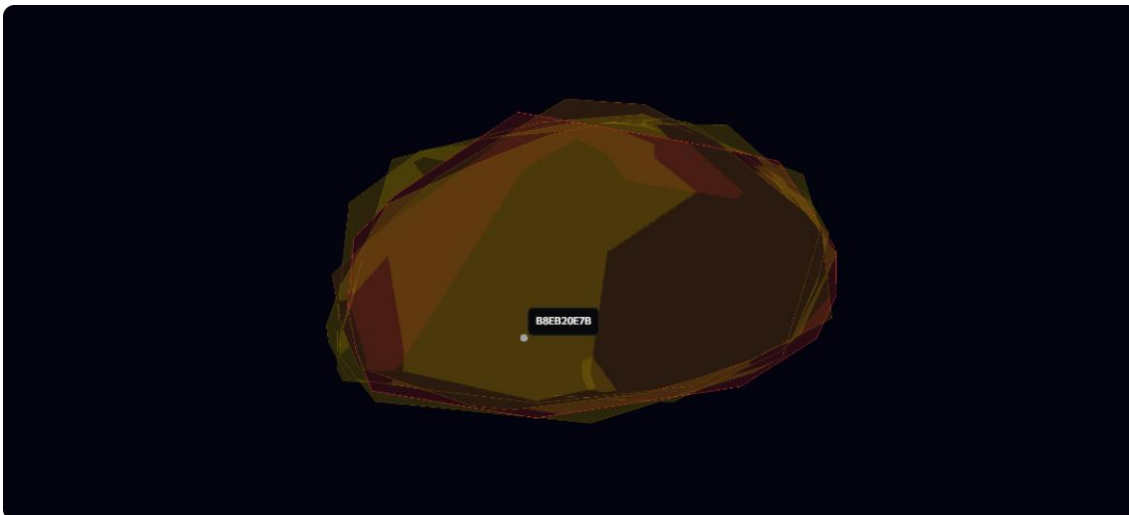


Figura 22: Visualização em *convex hulls* das manchas de óleo.

Outro modo implementado consiste na utilização de planos texturizados com gradientes de densidade (Figura 23), gerados a partir de uma imagem preparada especificamente para esse efeito. Esta abordagem foi concebida para fornecer uma leitura qualitativa e contínua da intensidade e dispersão das manchas, evitando a rigidez de contornos geométricos e sugerindo, de forma mais expressiva, a fluidez do fenómeno observado e foi substituído pela representação através de mapas de calor devido a limitações de desempenho e qualidade gráfica.

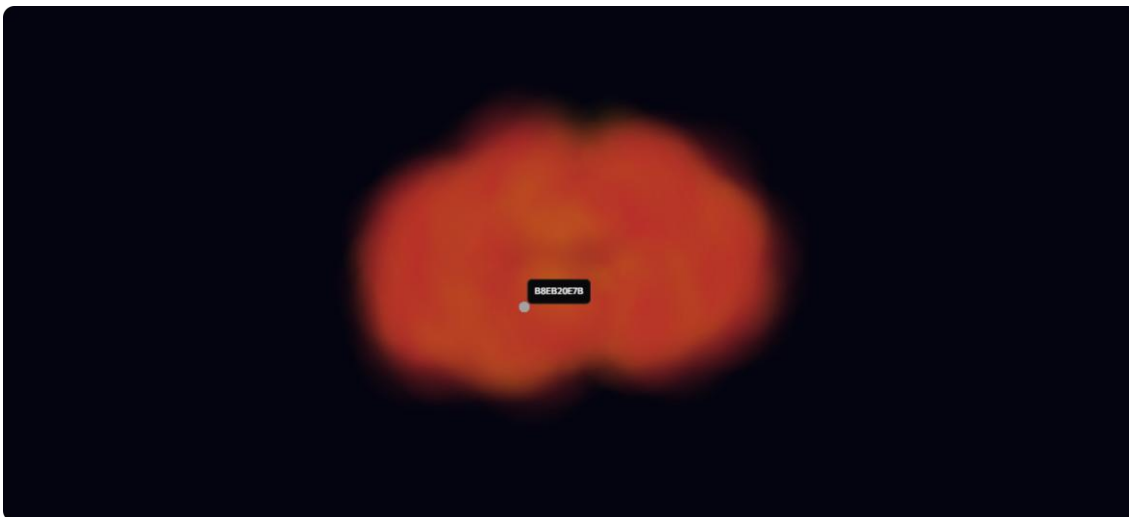


Figura 23: Visualização em manchas suavizadas com gradientes visuais.

Para além da representação das manchas, foi também integrada uma camada que indica visualmente o ator associado a cada evento, representado na Figura 24. Esta funcionalidade visa explicitar relações entre atores e manchas de óleo, reforçando a dimensão semântica da visualização e aprofundando o conceito de coreografia virtual como coordenação de múltiplas entidades e processos no espaço-tempo.

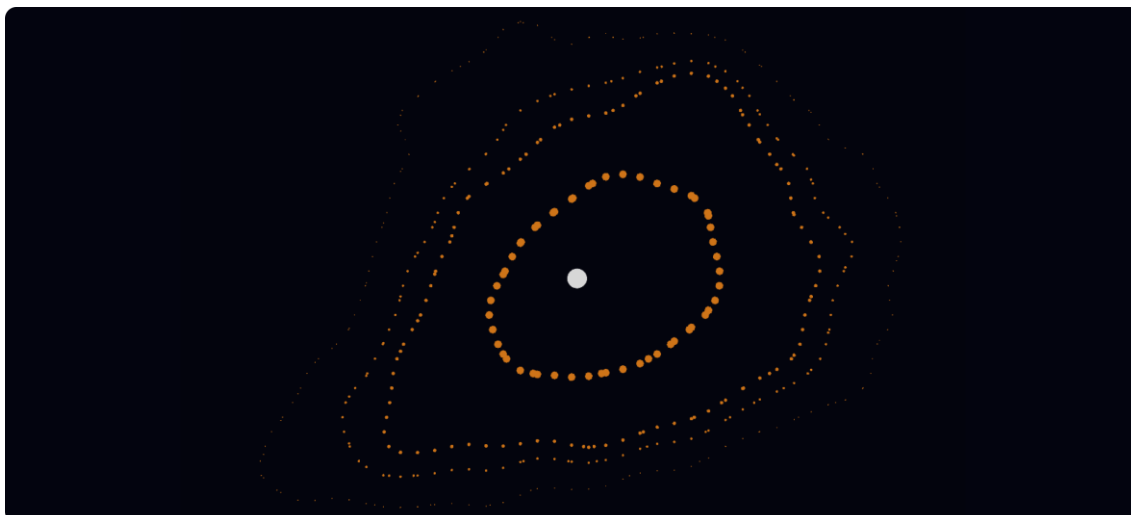


Figura 24: Visualização do ator e evento no globo.

A tabela de dados (Figura 25) foi igualmente aprimorada nesta fase. Foram adicionadas novas colunas com métricas relevantes, como a duração da mancha, a frequência de registo e o número total de pontos capturados ao longo do tempo. Foram também incluídos novos filtros, nomeadamente por duração e frequência, e mais colunas passaram a ser ordenáveis, reforçando a capacidade de análise e comparação por parte do utilizador.

ID	Area range (km ²)	Duration range (minutes)	Frequency range (minutes)	Columns visibility	Frequency
5B7A9D1F6					60
B8EB20ED2					240
A81BF2504					120
B8EB21029					120
B8EB20E5F	-8.39239 149.33590			273.92 km ² 960	120
B8EB20EB5	30.26012 -45.25728			243.57 km ² 480	60
B8EB20E7B	-24.36903 168.20798			246.98 km ² 480	60
B8EB20FAE	23.75233 60.54562			263.19 km ² 480	60
B8EB20FEE	-29.18476 -98.22373			240.78 km ² 480	60
B8EB20FD2	-18.28851 79.21967			257.66 km ² 480	60

Figura 25: Interface da tabela de dados das manchas de óleo na segunda fase.

A linha temporal (Figura 26) foi alvo de duas melhorias significativas. A primeira consistiu na introdução de um controlo de velocidade de reprodução, que permite ajustar o ritmo de

progressão dos eventos no tempo, facilitando a percepção da evolução das manchas e da respetiva coreografia visual. A segunda corresponde à integração de um filtro temporal acessível através de um calendário interativo, que possibilita restringir a análise a intervalos temporais específicos. Este filtro atua de forma sincronizada com a visualização no globo e com a linha temporal, assegurando a consistência da experiência exploratória. O seu estado é ainda refletido nos parâmetros de partilha do artefacto, permitindo a comunicação e reprodução de contextos analíticos entre utilizadores.

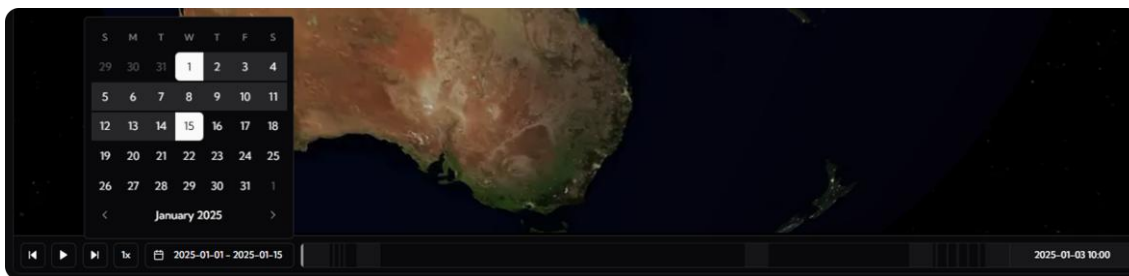


Figura 26 - Interface da linha temporal com os controlos de navegação temporal na segunda fase.

De modo a garantir uma experiência adaptável a diferentes contextos de utilização e capacidades de *hardware*, foram disponibilizadas opções de qualidade visual do globo. O utilizador pode escolher entre três níveis de detalhe nas texturas aplicadas (Figura 27), sendo utilizadas imagens otimizadas no formato WebP para equilibrar desempenho e fidelidade visual.



Figura 27: Comparação dos níveis de detalhe das texturas do globo e peso total das imagens.

Com o objetivo de reforçar a coerência visual e apoiar a percepção temporal da evolução dos fenómenos representados, foi implementado um efeito de ciclo de dia e noite sobre o globo tridimensional (Figura 28). Este mecanismo, desenvolvido através de *shaders* personalizados, permite simular dinamicamente a rotação da Terra e o posicionamento solar de acordo com o instante selecionado pelo utilizador. A aplicação contínua de gradientes de iluminação contribuiu para uma transição visual realista entre zonas diurnas e noturnas, reforçando a imersão visual e facilitando a interpretação do contexto temporal de cada mancha.

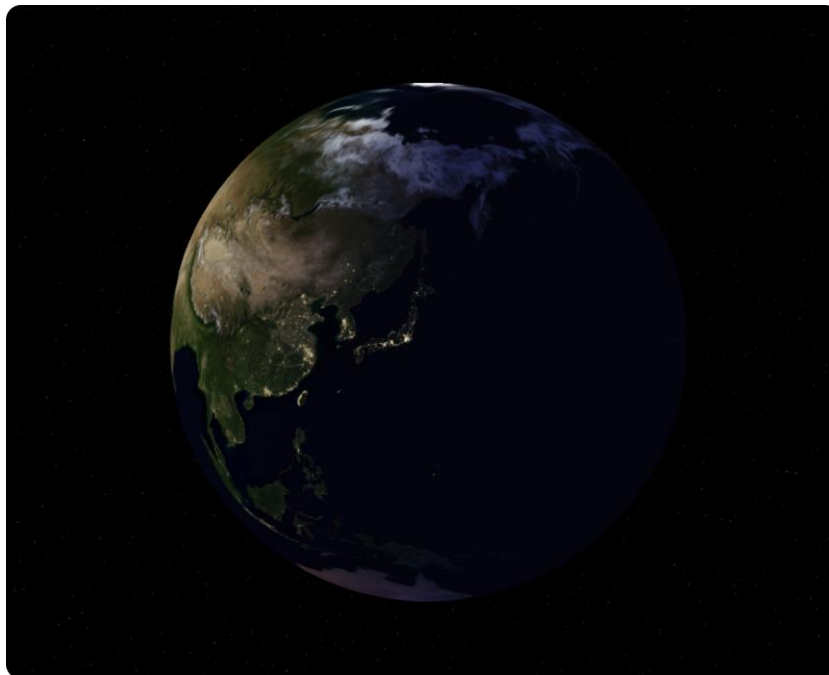


Figura 28: Visualização do ciclo de dia e noite no globo.

Para complementar a componente visual do artefacto, foi desenvolvida uma área de estatísticas interativas, concebida com o objetivo de fornecer suporte analítico à leitura dos dados. Esta funcionalidade articula as dimensões espacial e temporal com indicadores quantitativos, aprofundando a compreensão da dinâmica das manchas de óleo.

A apresentação das estatísticas organiza-se em dois níveis. Numa primeira vista geral (Figura 29), o utilizador pode comparar eventos distintos com base em métricas agregadas, como a área afetada, densidade de pontos por quilómetro quadrado, circularidade da forma, direção média de movimento e dispersão espacial. Estes indicadores contribuem para contextualizar a dimensão e a morfologia dos fenómenos representados.

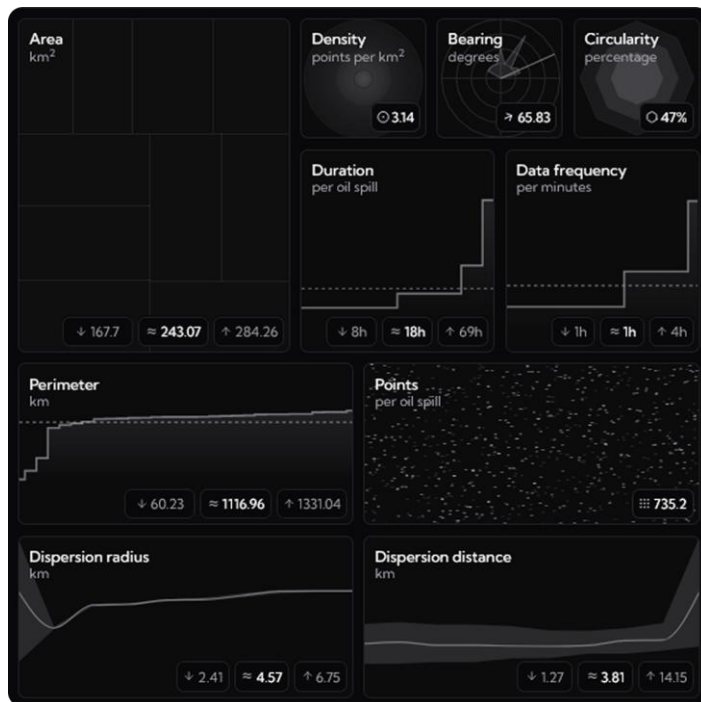


Figura 29: Visualização geral das estatísticas das manchas de óleo.

Numa segunda vista, centrada num único evento, são apresentados gráficos que ilustram a evolução temporal das principais métricas associadas a essa mancha (Figura 30). Esta abordagem permite acompanhar de forma detalhada a sua trajetória, variação de área, densidade e direção, bem como a sua dispersão em torno do centro de massa ao longo do tempo.

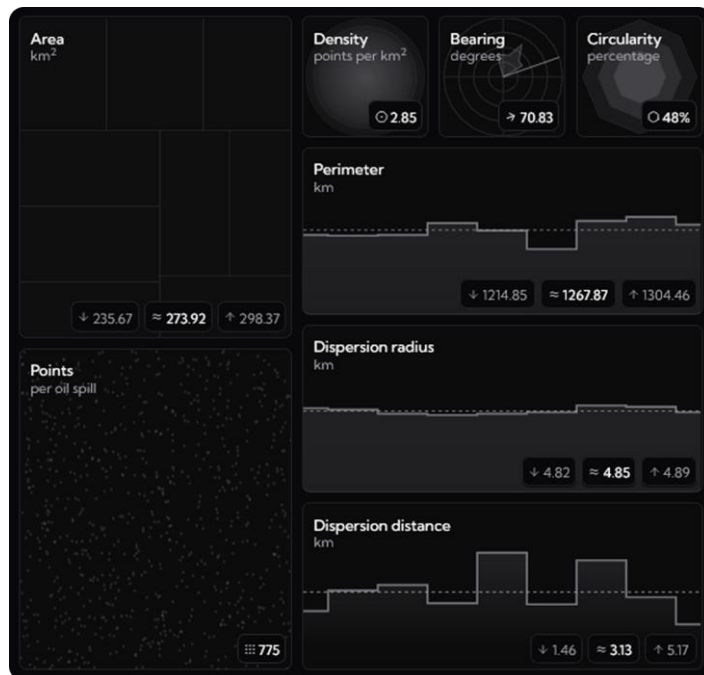


Figura 30: Visualização detalhada da evolução temporal de uma mancha de óleo.

A adaptabilidade do artefacto foi reforçada com a introdução de uma funcionalidade de carregamento de dados. Esta possibilidade permite estender a base de conhecimento do artefacto sem necessidade de intervenção técnica adicional. A interface de carregamento, com suporte a *drag-and-drop*, simplifica o processo e minimiza barreiras de utilização para públicos técnicos e não técnicos, representado na Figura 31.

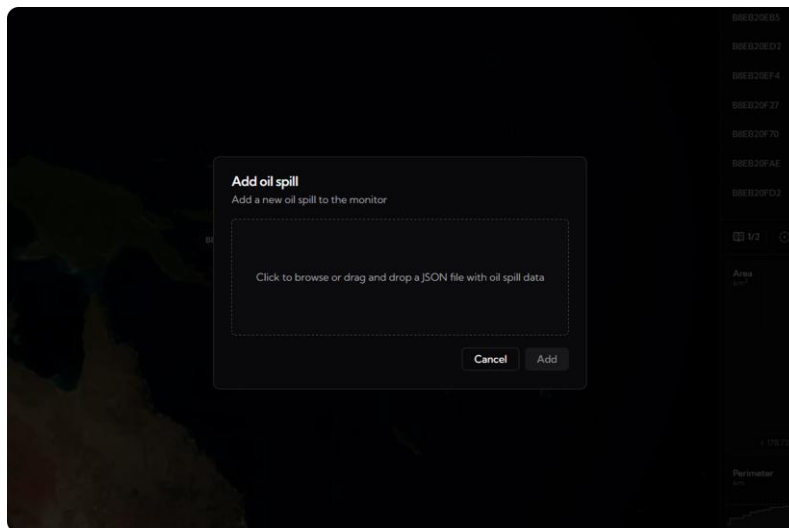


Figura 31: Modal de upload com interface *drag-and-drop*.

Durante o processo, os ficheiros submetidos são automaticamente validados quanto à estrutura de dados, incluindo a geometria, os *timestamps* e os atores envolvidos. A interface fornece feedback em tempo real sobre o progresso da operação. Uma vez validados, os dados são integrados na base de dados e processados por *triggers* que geram versões minimizadas para visualização no globo e atualizam as respetivas estatísticas.

Esta capacidade de extensão dinâmica está em consonância com a lógica iterativa da abordagem adotada e com os princípios da DSR. Permite a adaptação do artefacto a novos contextos e conjuntos de dados, aumentando a sua relevância e aplicabilidade em cenários diversos de monitorização e análise ambiental.

Com o objetivo de facilitar a apropriação da ferramenta por utilizadores com diferentes graus de literacia digital, foi incluída uma funcionalidade de visita guiada (Figura 32). Desenvolvida com base no feedback recolhido durante a primeira fase de testes, esta componente conduz o utilizador pelos principais elementos da interface — globo interativo, linha temporal e dados — explicando de forma progressiva o seu funcionamento e as possibilidades de interação.

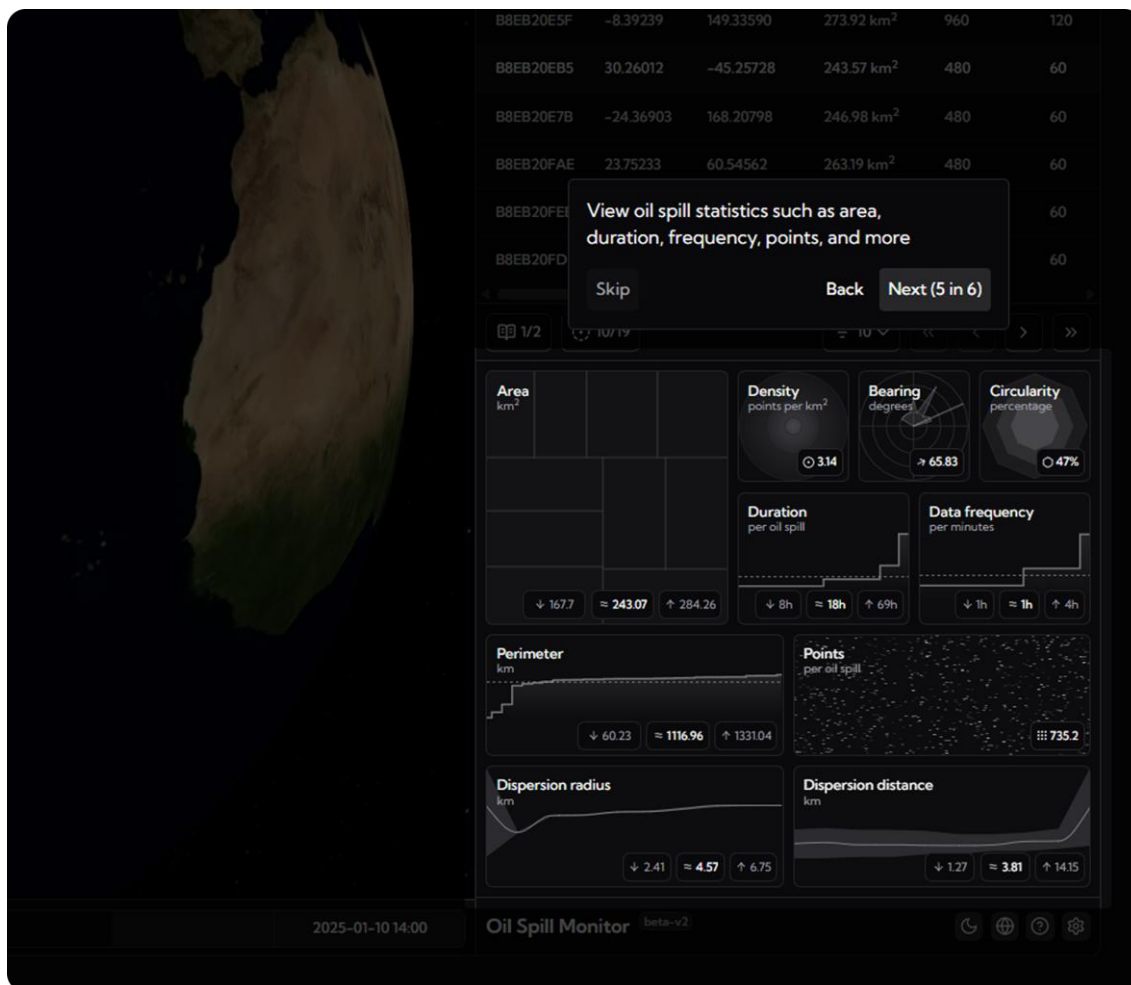


Figura 32: Interface da visita guiada.

Para além de reduzir a curva de aprendizagem, a visita guiada reforça a acessibilidade e a inclusão, tornando o artefacto apropriável por públicos não especializados. Esta abordagem está alinhada com os princípios do design centrado no utilizador, contribuindo para a clareza da representação e para a eficácia comunicacional da solução proposta.

Em síntese, a segunda fase de implementação permitiu materializar os princípios conceptuais delineados ao longo da investigação, dando origem a um artefacto funcional, interativo e extensível. A construção da interface, representada na Figura 33, reflete esta concretização, ao integrar de forma coerente os elementos necessários para representar e explorar coreografias virtuais de manchas de óleo. A solução desenvolvida respondeu diretamente aos objetivos estabelecidos: melhorar a compreensão visual dos dados, garantir uma representação narrativa e assegurar clareza interpretativa na leitura da informação. Esta fase correspondeu às etapas de desenho, desenvolvimento e demonstração, preparando o caminho para a avaliação empírica da solução.

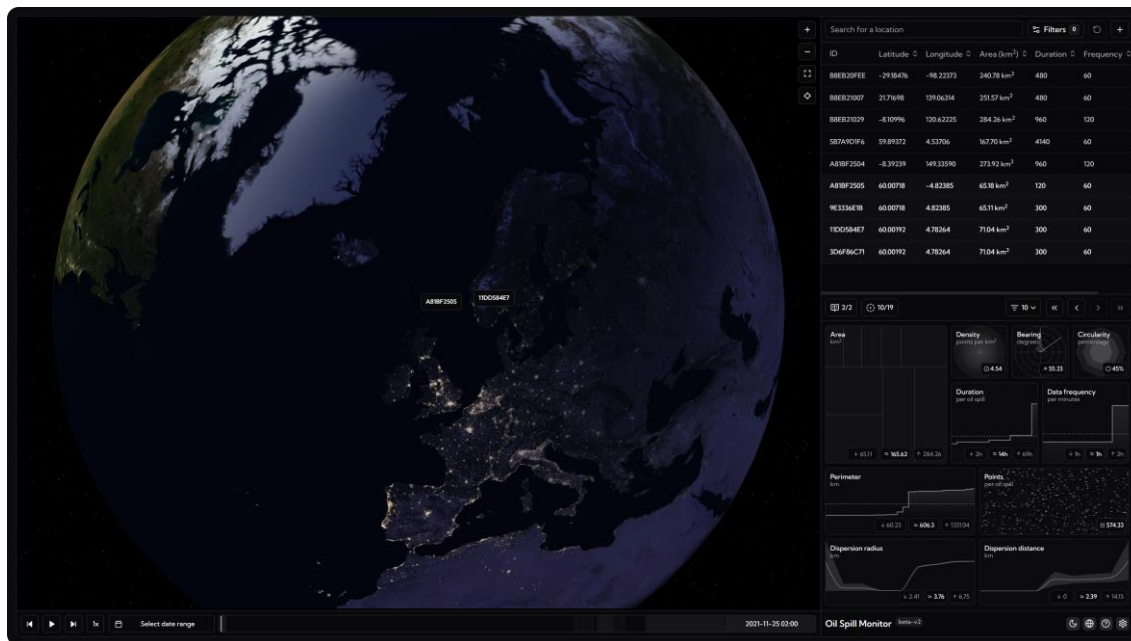


Figura 33: Interface do artefacto.

4.3 Limitações

A construção do artefacto seguiu uma abordagem incremental e iterativa, guiada pela progressiva materialização dos princípios conceptuais definidos ao longo da investigação. Embora a solução tenha respondido de forma eficaz aos objetivos traçados, em especial no que respeita à representação e exploração de coreografias virtuais de manchas de óleo, foram identificadas limitações relevantes que importa reconhecer, quer para contextualizar os resultados obtidos, quer para orientar desenvolvimentos futuros. As principais limitações são as seguintes:

- **Complexidade da arquitetura modular** — A definição de uma estrutura modular que garantisse simultaneamente desempenho, escalabilidade e responsividade implicou decisões técnicas exigentes. A separação de responsabilidades entre cliente e servidor revelou-se crítica, sobretudo no que toca à gestão e otimização do fluxo de dados. Para mitigar limitações de desempenho, foram implementadas versões minimizadas dos dados e *triggers* de pré-processamento. Ainda assim, esta solução implicou compromissos entre o nível de detalhe visual e a fluidez da interface.
- **Representação tridimensional das manchas** — A renderização visual das manchas de óleo foi um dos aspetos tecnicamente mais desafiantes. As abordagens iniciais, baseadas em mapas de calor, não asseguraram a estabilidade e legibilidade necessárias, afetando negativamente a clareza visual e o desempenho. Em resposta, adotaram-se planos texturizados com gradientes de densidade, que proporcionaram maior eficiência e

responsividade. No entanto, esta solução implicou alguma simplificação visual em cenários de elevada densidade informativa.

- **Capacidades analíticas limitadas** — As funcionalidades de análise foram introduzidas gradualmente ao longo do desenvolvimento, em resposta a necessidades emergentes. A inclusão de estatísticas básicas aumentou a capacidade interpretativa da visualização, mas subsiste margem para aprofundamento. Em particular, a futura integração de modelos de propagação ou de algoritmos de análise de trajetórias poderia permitir a identificação de padrões dinâmicos com maior profundidade e rigor.
- **Ausência de camadas visuais dinâmicas adicionais** — Algumas funcionalidades previstas inicialmente não foram incluídas na versão final do artefacto, como a simulação de fenómenos ambientais com *shaders* personalizados. Estas camadas gráficas teriam permitido representar, por exemplo, vetores de corrente ou variações de intensidade associadas ao fenómeno. A sua não implementação resultou da indisponibilidade de dados apropriados e da complexidade técnica envolvida. No entanto, a ausência destes elementos não comprometeu os objetivos centrais da investigação, dado que a solução construída já oferece uma representação clara, coesa e eficaz dos fenómenos em análise.

Em síntese, as limitações identificadas não invalidam os contributos alcançados, mas reforçam a complexidade do domínio abordado e a importância de adotar uma abordagem iterativa e progressiva na conceção de soluções interativas para a visualização de fenómenos ambientais dinâmicos.

4.4 Preparação da experiência e recolha de dados

A preparação da experiência empírica foi orientada por princípios de ética, clareza comunicacional e acessibilidade, assegurando condições adequadas para a recolha de dados relevantes à avaliação do artefacto desenvolvido. A participação decorreu de forma voluntária e anónima, com base num convite enviado por correio eletrónico, o qual incluía uma descrição do projeto, os objetivos do estudo e as condições de participação. Os participantes foram informados do seu direito a desistir a qualquer momento, tendo sido solicitado o seu consentimento explícito através do formulário de avaliação, em conformidade com os princípios éticos aplicáveis à investigação académica.

As sessões de teste foram conduzidas remotamente, através do acesso a uma instância funcional do artefacto (primeira¹ e segunda² versão) e a um formulário digital de recolha de dados (Anexo A). Embora a interface do artefacto esteja inicialmente apresentada em inglês, foi

¹ <https://osm-v1.vercel.app/>

² <https://osm-v2.vercel.app/>

disponibilizada a opção de utilização em português, de modo a garantir a acessibilidade a participantes com diferente preferência linguística.

O convite e o formulário de inquérito (primeira³ e segunda⁴ versão) foram redigidos integralmente em inglês, assegurando a consistência do processo de recolha. No entanto, tanto o conteúdo do convite como os resultados obtidos serão traduzidos e apresentados em português no corpo desta dissertação.

Cada participante foi convidado a interagir livremente com o artefacto, seguindo um guião de tarefas previamente definido, concebido para orientar a exploração das principais funcionalidades e permitir uma avaliação sistemática da experiência de utilização. Embora a estrutura base do guião se tenha mantido ao longo das duas fases da avaliação, foram introduzidas adaptações específicas em função do perfil dos utilizadores e da evolução do artefacto. Como se pode consultar nos Anexos B e C, foram utilizados guiões distintos para a primeira e segunda fase da experiência, respetivamente, assegurando a adequação ao contexto de cada iteração.

As tarefas propostas abrangeram ações como a aplicação de filtros, a análise de manchas de óleo, a navegação temporal e a utilização dos diferentes modos de visualização. Esta estrutura visou garantir a cobertura das principais dimensões interativas do artefacto, permitindo recolher feedback sobre a clareza, a coerência e a utilidade da representação.

Após a execução das tarefas, os participantes foram convidados a preencher um formulário baseado no modelo PSSUQ (*Post-Study System Usability Questionnaire*), complementado com um campo aberto para sugestões adicionais. Esta combinação metodológica permitiu recolher dados quantitativos e qualitativos sobre a perceção da usabilidade, da clareza da informação e da adequação funcional do artefacto. A estrutura dos formulários utilizados na primeira e segunda fase podem ser consultados no Anexo A, havendo diferença apenas no título e no conteúdo das tarefas em que o participante sentiu dificuldade entre as fases.

Os dados recolhidos foram exportados em formato estruturado CSV (*Comma-separated Values*), garantindo a sua integridade e facilitando a análise exploratória e comparativa entre as fases da avaliação.

³ <https://forms.gle/NpTG3TzRGRFEUPBZA>

⁴ <https://forms.gle/fwE2HHcEt9ahkLcq8>

5. Resultados obtidos

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento da aplicação proposta, descrevendo a solução implementada e analisando a sua performance e usabilidade. É realizada uma demonstração da aplicação atual, evidenciando as funcionalidades desenvolvidas e a experiência proporcionada ao utilizador.

Complementarmente, são apresentados os resultados das fases de testes realizadas e o respetivo feedback recolhido junto dos utilizadores, o qual se revelou fundamental para o desenvolvimento contínuo do artefacto e para orientar uma possível evolução futura da plataforma, permitindo identificar pontos fortes e aspetos a aprimorar.

Por fim, são discutidas as principais limitações identificadas ao longo do processo de desenvolvimento e validação, enquadrando as decisões tomadas e as funcionalidades que, por limitações técnicas ou estratégicas, não foram incluídas na versão atual do artefacto.

5.1 Análise dos testes realizados

Com o intuito de avaliar a eficácia da solução desenvolvida, foram realizadas duas fases de testes com utilizadores, cada uma envolvendo um grupo distinto de participantes. Para complementar a observação direta e o desempenho nas tarefas propostas, foi aplicado o PSSUQ, um instrumento padronizado amplamente utilizado na avaliação de sistemas interativos e que permite medir a perceção subjetiva dos utilizadores relativamente à facilidade de utilização, clareza da informação apresentada e qualidade geral da interface (UIUX Trend, 2025). A versão aplicada nesta investigação é composta por 16 afirmações, avaliadas numa escala de *Likert* de sete pontos, onde 1 significa “concordo totalmente” e 7 “discordo totalmente”. Quanto mais baixo o valor atribuído, mais positiva é a perceção do participante sobre o sistema. Quando um item não é preenchido, o respetivo campo é ignorado nos cálculos estatísticos.

O questionário está estruturado em três dimensões principais:

- **Utilidade do sistema (SysUse – itens 1 a 6)** – avalia facilidade de uso, rapidez na execução de tarefas e conforto na interação.
- **Qualidade da informação (InfoQual – itens 7 a 12)** – avalia clareza, organização e utilidade da informação apresentada.
- **Qualidade da interface (InterQual – itens 13 a 15)** – analisa apresentação gráfica, consistência e atratividade visual.

O item 16 é considerado de forma isolada e apenas contribui para o cálculo da média global e a lista completa dos 16 itens encontra-se incorporada no Anexo A.

5.1.1 Primeira fase

A primeira fase de testes contou com quatro participantes com experiência prévia na utilização de sistemas de visualização de dados ambientais. O principal objetivo desta etapa consistiu em obter feedback inicial sobre a clareza da interface, a estrutura das funcionalidades e a utilidade da visualização proposta, numa fase ainda formativa do desenvolvimento.

Os resultados recolhidos através do questionário encontram-se organizados por participante na Tabela 2, evidenciando variações significativas nos níveis de satisfação. O participante 1 (Anexo D) destaca-se pelas avaliações mais críticas, visíveis nos tons vermelhos associados a valores entre 5 e 6. Em contraste, os restantes participantes atribuem valores mais positivos, com especial destaque para a qualidade da interface (InterQual), onde se verificam várias respostas na zona verde (valores 1 e 2), sugerindo boa aceitação dos elementos visuais e da interação proposta.

Tabela 2: Respostas individuais ao questionário na primeira fase.

P	Anexo	SYSUSE						INFOQUAL						INTERQUAL			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	D	6	5	6	6	6	5	6	6	4	4	5	3	5	4	4	4
2	E	2	2	3	3	2	3		3	3	3	4	2	2	2	4	2
3	F	1	2	2	2	1	4	4	2	2	3	2	1	1	2	2	2
4	G	3	3	3	2	3	2	4	4	4	3	2	2	1	1	2	2

Resultados obtidos

A Figura 34 apresenta as médias por subescala e a média global de cada participante. A média geral obtida reflete uma percepção tendencialmente positiva, tendo em conta que a escala de avaliação varia de 1 (melhor) a 7 (pior). As subescalas InterQual e SysUse revelam avaliações mais favoráveis, enquanto a InfoQual apresenta maior dispersão, o que indica dúvidas na organização ou clareza da informação apresentada.

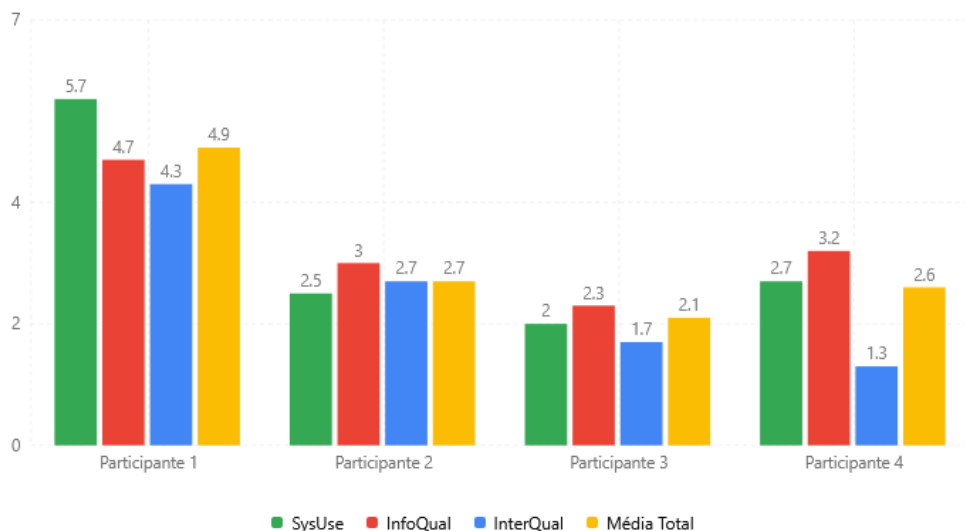


Figura 34 – Gráfico dos resultados médios por subescala e média na primeira fase.

Complementarmente, a Figura 35 sintetiza as tarefas que suscitaram dificuldades por participante. A tarefa 3, que envolve a desativação do ciclo de dia/noite, foi assinalada por todos os participantes, o que sugere uma localização pouco evidente da funcionalidade ou terminologia pouco intuitiva. A tarefa 6, que exige a seleção de um momento na linha temporal e a identificação da mancha correspondente no globo, revelou-se exigente devido à ausência de reposicionamento automático da vista. Já a tarefa 9, associada ao acesso ao detalhe de uma mancha diretamente no globo, expôs uma expectativa não correspondida: os elementos visuais não eram interativos, o que gerou frustração.

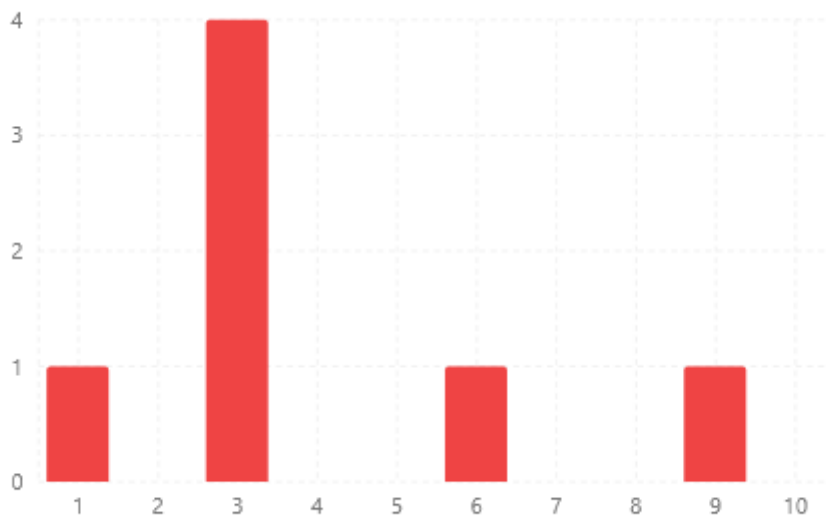


Figura 35 - Gráfico das tarefas que suscitaron dificuldades na primeira fase.

De forma geral, esta fase confirmou o potencial da proposta, mas também destacou limitações críticas na experiência de utilização, sobretudo relacionadas com o posicionamento das funcionalidades e o alinhamento entre representação visual e comportamento esperado. As observações recolhidas nesta etapa foram fundamentais para orientar as melhorias aplicadas na segunda fase do ciclo.

5.1.2 Segunda fase

A segunda fase de testes envolveu cinco participantes sem experiência prévia com sistemas de visualização ambiental, seleccionados de forma a representar um público generalista. Esta etapa teve como principal objetivo avaliar a clareza da interface e a eficácia das funcionalidades numa versão mais madura do artefacto, após a incorporação das melhorias identificadas na fase anterior.

As respostas ao questionário estão compiladas na Tabela 3, onde se verifica uma tendência clara para valores mais baixos (verdes), indicativos de satisfações mais positivas. As respostas mantêm-se consistentemente entre 1 e 3, com poucas exceções, e os campos em branco correspondem a itens não respondidos, assinalados a cinzento. Tais omissões são expectáveis em perguntas que exigem contacto com funcionalidades mais especializadas, como a gestão de dados, ou com situações de erro, aspetos que não foram experienciados por todos os participantes.

Tabela 3: Respostas individuais ao questionário na segunda fase.

P	Anexo	SYSUSE						INFOQUAL						INTERQUAL			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	H	2	3	3	2	2	2	3	2	1	2	2	2	1	1	3	2
6	I	2	2	3	2	2			3	1	2	2	2	1	2		2
7	J	1	2	2	2	2			1	1	2	2	1	1	2		1
8	K	2	3	2	2	3			2	2	2	3	3	1	2		2
9	L	2	1	2	1	2	2		4	2	2	2	2	1	1		2

A Figura 36 mostra os resultados médios por subescala, confirmando a melhoria face à fase anterior. A média global da fase situa-se num valor bastante próximo do limite inferior da escala (1), sugerindo uma perceção altamente positiva. A dimensão InterQual, relacionada com a qualidade da interface, atingiu a média mais baixa entre todas as subescalas, evidenciando a solidez das melhorias introduzidas ao nível visual e interativo. As subescalas SysUse e InfoQual refletem igualmente uma avaliação positiva, embora com pequenas variações entre participantes.

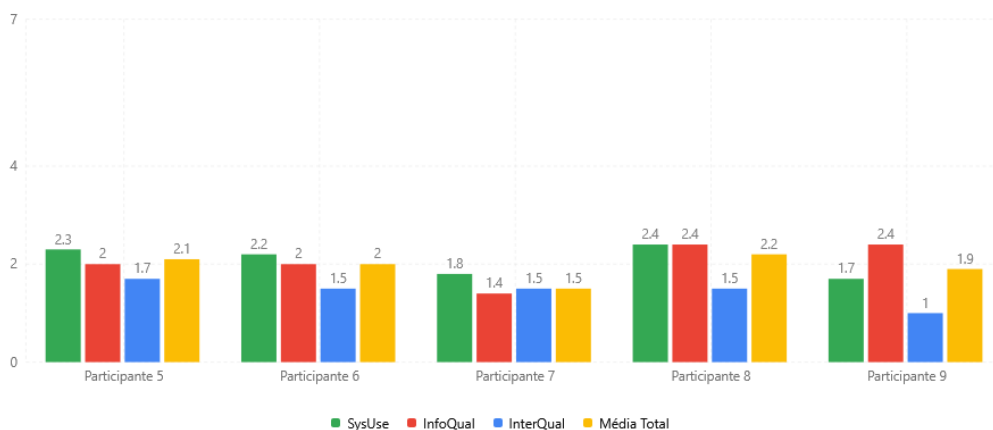


Figura 36 - Gráfico dos resultados médios por subescala e média na segunda fase.

Resultados obtidos

A Figura 37, relativa às tarefas que suscitaram dificuldades, revela uma distribuição mais dispersa de problemas do que na fase anterior. A tarefa 3, relacionada com a mudança do modo de visualização para manchas suavizadas, voltou a ser assinalada pela maioria dos participantes, sugerindo que a reformulação da interface ainda não resolveu por completo as ambiguidades nesta funcionalidade. A tarefa 6, sobre reposicionar o globo para o derrame ativo, também gerou dificuldades, reforçando a necessidade de tornar este controlo mais visível ou intuitivo.

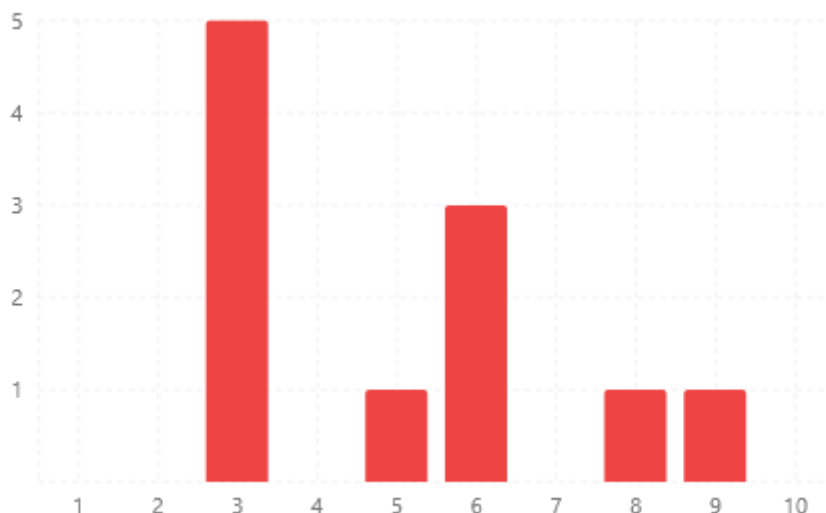


Figura 37 - Gráfico das tarefas que suscitaram dificuldades na segunda fase.

Foram ainda registadas dificuldades pontuais nas tarefas 5, 8 e 9, geralmente associadas à densidade funcional do sistema ou à distribuição menos evidente de certas opções no interface. A dispersão observada é compatível com o perfil dos participantes, que não tinham contacto prévio com sistemas do género e enfrentaram o desafio de explorar uma aplicação rica em funcionalidades. Ainda assim, a maioria das tarefas foi completada com sucesso, evidenciando uma curva de aprendizagem rápida e uma boa apropriação do artefacto mesmo por parte de utilizadores não especializados.

5.1.3 Análise geral

Para além das médias quantitativas, cada inquérito preenchido revelou aspetos específicos que, individualmente ou em conjunto, contribuíram para refinar a solução desenvolvida. As observações recolhidas, mesmo quando pontuais, permitiram ajustar funcionalidades, clarificar interações e repensar decisões de interface, refletindo-se diretamente na evolução entre as duas fases. Este processo iterativo de avaliação foi essencial não apenas para validar a proposta, mas também para identificar linhas de melhoria contínua com relevância para trabalhos futuros. A secção seguinte aprofunda a leitura qualitativa dos contributos e perspetivas dos participantes,

com especial enfoque nas sugestões de alteração direta e na perceção global de satisfação com o artefacto.

5.2 Análise qualitativa dos contributos dos participantes

Para além das métricas quantitativas recolhidas através do inquérito, foi solicitado aos participantes, no final de cada sessão, que indicassem o que mudariam na aplicação após a sua utilização. Esta questão aberta revelou-se fundamental para captar perceções mais subjetivas, identificar pontos críticos de interação e antecipar necessidades futuras. A análise dos testemunhos recolhidos em ambas as fases complementa os dados quantitativos e contribui para uma leitura mais rica do impacto da solução junto dos utilizadores.

As contribuições da primeira fase, com participantes com experiência em sistemas de visualização, permitiram identificar limitações estruturais do artefacto e foram determinantes para as melhorias implementadas na versão seguinte:

- **Participante 1 (Anexo D)**

Assinalou dificuldades na localização de opções e sugeriu ajuda contextual para novos utilizadores, o que levou à implementação da visita guiada.

- **Participante 2 (Anexo E)**

Apontou falhas de feedback no ciclo de dia/noite e clicabilidade irregular das manchas. Estas limitações técnicas foram corrigidas na versão seguinte.

- **Participante 3 (Anexo F)**

Reportou a ausência de reposicionamento automático da câmara ao sair da vista detalhada. A solução foi introduzir transições automáticas e reposição fluida da vista em mudanças de contexto.

- **Participante 4 (Anexo G)**

Propôs um botão para regressar à mancha em foco após navegar no globo, resultando na implementação de um controlo específico para esse fim.

Na segunda fase participaram cinco utilizadores generalistas, sem contacto anterior com o sistema. As suas observações não implicaram mudanças estruturais imediatas, mas revelaram-se valiosas para validar as opções tomadas e levantar possibilidades de aperfeiçoamento futuro:

- **Participante 5 (Anexo H)**

Indicou que as definições estavam pouco visíveis e sugeriu apresentá-las logo no início, realçando o impacto da mudança de posição do botão.

- **Participante 6 (Anexo I)**

Considerou que o guia inicial deveria ser mais completo e obrigatório, apontando limitações no modelo atual de *onboarding*.

- **Participante 7 (Anexo J)**

Tentou alterar o modo de visualização diretamente na mancha, sem saber que a opção estava nas definições, sugerindo um acesso mais intuitivo.

- **Participante 8 (Anexo K)**

Relatou sentir-se sobrecarregado com a quantidade de funcionalidades, sugerindo que a ajuda contextual fosse apresentada de forma progressiva, de modo a facilitar a adaptação inicial.

- **Participante 9 (Anexo L)**

Sugeriu representar a direção do movimento com setas e um alerta automático para reencontrar a mancha de foco, além de ter identificado uma falha no controlo da câmara durante a reprodução.

Em conjunto, os contributos recolhidos demonstram a importância de envolver utilizadores com diferentes perfis em fases distintas da investigação. Enquanto os participantes da primeira fase permitiram identificar e corrigir falhas estruturais, os da segunda fase ajudaram a consolidar decisões anteriores e a levantar novas possibilidades de melhoria. Esta abordagem iterativa e centrada no utilizador revelou-se essencial para garantir a coerência, clareza e robustez do artefacto final.

5.3 Síntese crítica e limitações de estudo

A avaliação conduzida ao longo das duas fases de testes permitiu validar de forma sustentada a proposta de representação tridimensional interativa e compreender, em profundidade, os seus méritos, limitações e potencial evolutivo. A triangulação entre dados quantitativos obtidos através do PSSUQ, dificuldades sentidas e contributos qualitativos dos participantes viabilizou uma leitura crítica, contextualizada e orientada para a melhoria contínua do artefacto, confirmando a sua utilidade prática e a relevância das opções de conceção adotadas.

A primeira fase de testes, centrada num grupo de utilizadores com experiência prévia em sistemas de visualização, foi particularmente eficaz na identificação de falhas estruturais e oportunidades de reformulação da interface. Entre os principais pontos críticos identificados destacaram-se a ausência de mecanismos de orientação, fragilidades na comunicação visual de estados, e dificuldades de navegação espacial em contexto dinâmico. Estas observações, ancoradas numa análise experiente da aplicação, orientaram intervenções concretas na organização funcional, no comportamento da câmara e nos mecanismos de feedback visual e textual.

A segunda fase, por sua vez, focou-se na validação das melhorias introduzidas e na análise da perceção de utilizadores não especializados. O desempenho positivo deste grupo, refletido nos indicadores do questionário e nos comentários recolhidos, confirmou a eficácia das reformulações e revelou a robustez da solução em cenários de uso não técnico. Adicionalmente, foram levantadas

novas sugestões de melhoria, como a acessibilidade às definições ou a representação da direção do movimento, que apontam caminhos relevantes para evolução futura.

A estratégia de avaliação seguiu de forma coerente o DSR, articulando iteração e reflexão empírica. Cada fase contribuiu para consolidar o artefacto: a primeira, como momento de diagnóstico e reformulação; a segunda, como verificação e base para refinamento adicional. Este ciclo de validação com utilizadores distintos assegurou não apenas a robustez funcional da proposta, mas também a sua adequação aos contextos previstos de utilização.

Naturalmente, o estudo apresenta limitações que importa reconhecer. Desde logo, a amostra total de participantes é reduzida e não representa a diversidade de perfis que o sistema poderá vir a acolher. Embora a combinação entre perfis especializados e generalistas tenha garantido um equilíbrio relevante, os resultados obtidos não são extrapoláveis em termos estatísticos. Contudo, no quadro de uma investigação aplicada com objetivos exploratórios e iterativos, a amostra revelou-se adequada para aferir criticamente a qualidade da solução e orientar decisões de desenvolvimento.

Outra limitação decorre da composição dos grupos testados. A inclusão, na segunda fase, de um segundo grupo com os mesmos participantes da primeira teria possibilitado uma análise longitudinal direta, permitindo avaliar comparativamente a evolução da experiência com base no uso repetido. A ausência deste grupo impediu a medição formal de progresso individual, embora os indicadores da segunda fase, por si só, tenham demonstrado ganhos claros de usabilidade.

Importa ainda referir que, apesar das melhorias significativas introduzidas na representação visual das manchas de óleo e na funcionalidade de adição de dados durante a segunda fase de desenvolvimento, não foi possível validar essas alterações com o grupo de utilizadores mais experientes que participou na fase inicial. Esta limitação impediu a obtenção de parecer técnico sobre a precisão da representação final, assim como sobre a eficácia das funcionalidades avançadas em contextos próximos do uso profissional. A ausência desse retorno restringiu a possibilidade de responder de forma plena à terceira questão de investigação de garantir a clareza dos dados, uma vez que a comparação entre perspetivas especializadas e generalistas teria permitido avaliar, com maior rigor, o grau de interpretabilidade e legibilidade do sistema junto de diferentes públicos.

Ainda assim, os restantes objetivos operacionais foram satisfatoriamente alcançados. O primeiro de como melhorar a compreensão visual dos dados, encontra validação clara na receção positiva da interface tridimensional, capaz de integrar múltiplos dados espaciais e temporais de forma coerente e explorável. A capacidade de manipular o globo, aplicar filtros, ajustar a linha temporal e consultar resumos informativos permitiu aos utilizadores construir uma leitura clara e contextualizada dos fenómenos apresentados. A articulação entre escalas e a fluidez da navegação reforçam o valor da plataforma enquanto ferramenta de apoio à análise visual.

O segundo objetivo de como interpretar as coreografias virtuais foi também demonstrado com sucesso. A implementação de uma linha temporal responsiva, a atualização contínua das texturas representativas das manchas de óleo e a coordenação entre extensão, densidade e

localização em tempo real confirmaram o potencial da abordagem coreográfica adotada. A resposta dos participantes evidencia que, mesmo sem formação técnica específica, é possível reconhecer padrões, compreender a progressão dos eventos e acompanhar a transformação espacial e temporal das manchas. Esta constatação sustenta a hipótese da dissertação quanto ao contributo das coreografias virtuais tridimensionais para uma melhor compreensão de fenómenos ambientais dinâmicos.

Já a terceira questão de investigação de como garantir a clareza dos dados foi, como referido, parcialmente endereçada. Embora o grupo da segunda fase tenha revelado facilidade de apropriação e uma curva de aprendizagem rápida, a ausência de validação final por parte de utilizadores com conhecimento técnico específico sobre o domínio das manchas de óleo limitou o alcance conclusivo desta dimensão. Ainda assim, os dados recolhidos junto de participantes sem experiência na área permitiram confirmar que o sistema oferece uma experiência clara, acessível e bem estruturada para públicos não especializados, o que representa um contributo relevante tendo em conta os objetivos de disseminação e usabilidade ampla do artefacto.

Em termos interpretativos, os resultados obtidos refletem um equilíbrio positivo entre complexidade funcional e clareza de utilização. A qualidade dos contributos recolhidos, aliada à consistência dos resultados quantitativos, permitiu validar decisões de desenho, como a visita guiada, o reposicionamento automático da câmara, o comportamento da linha temporal e o foco especial, ao mesmo tempo que revelou caminhos futuros para evolução do sistema. Entre os aspetos apontados para desenvolvimento destacam-se a simplificação da experiência inicial, a integração de menus contextuais, a representação vetorial de direção e a personalização da interface em função do perfil do utilizador.

Em síntese, apesar das limitações metodológicas reconhecidas, os resultados da avaliação revelaram-se sólidos, pertinentes e alinhados com os objetivos delineados. O artefacto demonstrou ser capaz de articular rigor técnico, clareza visual e coerência interativa, constituindo uma resposta eficaz aos desafios identificados na fase inicial da investigação. O envolvimento ativo dos utilizadores ao longo do processo reforça o valor das abordagens iterativas no desenvolvimento de soluções aplicadas e evidencia o potencial do artefacto como base para aplicações futuras no domínio da monitorização ambiental interativa.

6. Conclusão

Este capítulo apresenta uma síntese dos principais contributos da investigação realizada, organizada em três eixos: o percurso metodológico e a proposta desenvolvida, os resultados obtidos e respetiva validação, e, por fim, as limitações identificadas e as perspetivas para trabalho futuro. O objetivo é consolidar a resposta às questões de investigação e refletir sobre o impacto e a continuidade do trabalho desenvolvido.

6.1 Percurso e proposta desenvolvida

A presente dissertação procurou dar resposta à necessidade de representar, de forma clara e interativa, fenómenos ambientais complexos como as manchas de óleo em contexto oceânico. Partindo da hipótese de que uma abordagem tridimensional imersiva, baseada em coreografias virtuais, poderia facilitar a leitura da sua evolução no tempo e no espaço, foram desenvolvidas e testadas soluções visuais orientadas para diferentes perfis de utilizador.

A motivação emergiu da constatação de uma lacuna entre as ferramentas de visualização geoespacial existentes e as exigências atuais de análise ambiental dinâmica. A investigação definiu três questões orientadoras, centradas na clareza visual, na interpretação das coreografias de dados e na adequação da solução a públicos diversos, seguindo a abordagem metodológica assente no modelo *Design Science Research* (DSR), que permitiu estruturar o percurso em ciclos iterativos de conceção, implementação e avaliação.

Foi realizada uma análise aprofundada da literatura, dos projetos existentes e das soluções tecnológicas aplicadas à visualização de fenómenos ambientais e georreferenciados. Essa revisão demonstrou que, apesar da evolução das interfaces digitais e das representações tridimensionais, permanece limitada a oferta de soluções que conjuguem espacialidade e temporalidade de forma coerente e interativa. A análise do estado da arte permitiu ainda fundamentar a necessidade de uma proposta que articule rigor técnico com clareza visual, numa experiência que favoreça tanto a exploração livre como a leitura analítica.

A solução desenvolvida teve por base um modelo conceptual centrado no utilizador e nos princípios da coreografia virtual, prevendo a sincronização contínua de camadas como localização, densidade, extensão e tempo. Foram definidos requisitos funcionais e não funcionais para guiar a conceção do artefacto, que integrou elementos como uma linha temporal interativa, filtros avançados, modos de visualização distintos e mecanismos de controlo espacial. O planeamento refletiu uma estratégia orientada a ciclos, prevendo uma primeira fase de testes com utilizadores especializados e uma segunda fase com participantes não familiarizados com o domínio.

O artefacto foi desenvolvido de forma incremental, enfrentando desafios significativos na gestão de desempenho, clareza visual e organização modular. Foram introduzidas soluções específicas como a utilização de camadas texturizadas para representar manchas de óleo, a pré-processamento de dados para garantir fluidez e a segmentação clara entre visualização, lógica e dados. Embora certas funcionalidades mais avançadas, como a representação das manchas através de *shaders*, não tenham sido implementadas por limitação técnica ou de dados, a solução final demonstrou ser robusta, responsiva e eficaz na representação do fenómeno.

6.2 Validação e contributos

A avaliação da solução permitiu aferir, de forma sólida, a sua utilidade, eficácia e adequação aos objetivos definidos. A realização de duas fases de testes com perfis distintos de utilizadores, primeiro com participantes especializados e depois com um público generalista, assegurou uma leitura abrangente do desempenho do artefacto em diferentes contextos de uso.

Na fase inicial, as contribuições dos utilizadores com experiência em visualização geoespacial revelaram-se fundamentais para identificar fragilidades estruturais e inconsistências na interface. Estas observações conduziram a melhorias significativas na organização da informação e na fluidez da interação. Já na segunda fase, os participantes sem formação técnica evidenciaram uma curva de aprendizagem rápida, demonstrando facilidade de apropriação da ferramenta e capacidade para interpretar os dados representados, mesmo sem conhecimentos prévios do domínio.

A análise cruzada entre dados qualitativos e quantitativos reforçou a robustez da proposta e validou os pressupostos teóricos que sustentam o modelo de coreografias virtuais. Em particular, destaca-se o contributo da representação tridimensional na melhoria da compreensão visual dos dados e o papel da linha temporal interativa na construção de uma leitura narrativa coesa. A solução revelou-se não apenas funcional e acessível, mas também expressiva, ao conseguir traduzir dinâmicas ambientais complexas num formato explorável e intuitivo.

Apesar da impossibilidade de recolher uma validação final por parte dos especialistas da fase inicial, os dados obtidos indicam que a proposta responde com consistência às três questões de investigação. As dimensões de clareza visual, coerência na representação e adequação a

públicos diversos foram amplamente trabalhadas ao longo do processo e confirmadas nos resultados obtidos.

6.3 Limitações e perspectivas futuras

A natureza experimental do trabalho implicou algumas limitações que importa reconhecer. O número reduzido de participantes, a ausência de testes longitudinais e certas condicionantes técnicas, como a complexidade de implementar shaders personalizados com base em dados reais, limitaram o alcance da proposta. Ainda assim, essas limitações não invalidam os resultados alcançados; pelo contrário, reforçam a importância da abordagem iterativa adotada, onde cada ciclo contribuiu para uma versão mais sólida e refinada da solução.

Entre as oportunidades de aprofundamento destaca-se a possibilidade de representar a direção e velocidade do movimento das manchas, integrando vetores dinâmicos na visualização. Também se identificam como promissoras a introdução de menus contextuais e a personalização da interface com base em perfis de utilizador, potenciando experiências mais orientadas e eficazes. A integração do artefacto em plataformas colaborativas reais, como as previstas no âmbito do projeto ILIAD, constitui outro caminho relevante, permitindo testar a solução em ambientes operacionais e alargar a sua utilidade prática.

Este percurso conecta-se com trabalhos prévios em contextos industriais, nos quais as coreografias virtuais têm sido utilizadas para representar comportamentos e procedimentos técnicos em ambientes imersivos com elevado nível de abstração semântica (Cassola et al., 2022). Mais recentemente, a sua aplicação à monitorização oceânica tem vindo a ser explorada no âmbito de ecossistemas multiplataforma, como demonstrado por Lacet et al. (2025), abrindo caminho para a generalização destas técnicas a novos domínios. A investigação desenvolvida nesta dissertação abre, assim, uma base sólida para futuros desenvolvimentos, sustentando o potencial das coreografias virtuais como linguagem visual para a comunicação de fenómenos ambientais em tempo real e em plataformas acessíveis, informativas e expressivas.

Referências

- Ahasan, R., Alam, M., Chakraborty, T., & Hossain, M. (2022). Applications of GIS and geospatial analyses in COVID-19 research: A systematic review. *F1000Research*, 9, 1379. <https://doi.org/10.12688/f1000research.27544.2>
- Asif, Z., Chen, Z., An, C., & Dong, J. (2022). Environmental impacts and challenges associated with oil spills on shorelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 762. <https://doi.org/10.3390/jmse10060762>
- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (1986). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M., & Garrido, J. (1996). Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20(3), 395–403. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)
- Cassola, F., Mendes, D., Coelho, A., Pinto, M., Paredes, H., Morgado, L., Costa, S., Anjos, L., Marques, D., Rosa, F., Maia, A., & Tavares, H. (2022). Design and evaluation of a choreography-based virtual reality authoring tool for experiential learning in industrial training. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 15(5), 526–538. <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3157065>
- Chen, C., Han, Y., Galinski, A., Calle, C., Carney, J., Ye, X., & van Westen, C. (2024). Integrating urban digital twins with cloud-based geospatial dashboards for coastal resilience planning: A case study in Florida. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.18188>
- Duarte, E., Bordonhos, P., Dias, P., & Santos, B. S. (2016). Living globe: Tridimensional interactive visualization of world demographic data. In *Human interface and the management of information: Information, design and interaction – 18th International Conference, HCI International 2016, Toronto, Canada, Proceedings, Part I* (pp. 14–24). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40349-6>

Referências

- Google Earth. (2025). Disponível em:
<https://earth.google.com/web>
- Google Experiments. (n.d.). WebGL globe. Disponível em:
<https://experiments.withgoogle.com/chrome/globe>
- Harmon, J. E., & Anderson, S. J. (2003). *The design and implementation of geographic information systems*. John Wiley & Sons.
- Hevner, A. (2007). A three cycle view of design science research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 87–92. Disponível em:
<https://aisel.aisnet.org/sjis/vol19/iss2/4/>
- ILIAD. (2025). ILIAD digital twin of the ocean. Disponível em:
<https://iliad.inesctec.pt/>
- Khronos Group. (2025). WebGL. Disponível em:
<https://www.khronos.org/webgl/>
- Lacet, D., Cassola, F., Valle, A., Oliveira, M., & Morgado, L. (2025). Multiplatform ecosystem for visualizing ocean dynamic formations with virtual choreographies: Oil spill case. In *2025 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Saint Malo, France (pp. 438–446). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/VRW66409.2025.00097>
- Langran, G. (1992). *Time in geographic information systems*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003062592>
- Li, S., Jaroszynski, S., Pearse, S., Orf, L., & Clyne, J. (2019). VAPOR: A visualization package tailored to analyze simulation data in earth system science. *Atmosphere*, 10(9), 488.
<https://doi.org/10.3390/atmos10090488>
- Mapbox. (2025). Mapbox GL JS: Guides. Disponível em:
<https://docs.mapbox.com/mapbox-gl-js/guides/>
- NASA Worldview. (2025). Disponível em:
<https://worldview.earthdata.nasa.gov>
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '90)* (pp. 249–256). Association for Computing Machinery.
<https://doi.org/10.1145/97243.97281>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77.
<https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

Referências

- Robinson, L. (2025). Building APIs with Next.js Blog. Disponível em:
<https://nextjs.org/blog/building-apis-with-nextjs>
- Schewe, K.-D., Aït-Ameur, Y., & Benyagoub, S. (2021). Realisability of control-state choreographies. In C. Attiogbé & S. Ben Yahia (Eds.), *Model and data engineering: 10th International Conference, MEDI 2021, Tallinn, Estonia, June 21–23, 2021, Proceedings* (pp. 87–100). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-78428-7_8
- Silva, E., Silva, N., & Morgado, L. (2014). Model-driven generation of multi-user and multi-domain choreographies for staging in multiple virtual world platforms. In M. Mokhtari, S. Ben Yahia, & R. Saidi (Eds.), *Model and data engineering: 4th International Conference, MEDI 2014, Larnaca, Cyprus, September 24–26, 2014, Proceedings* (pp. 77–91). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-11587-0_9
- Three.js Foundation. (2025). Three.js. Disponível em:
<https://threejs.org/>
- Uber. (2025). deck.gl. Disponível em:
<https://deck.gl/>
- UIUX Trend. (2025). PSSUQ – Post Study System Usability Questionnaire. Disponível em:
<https://uiuxtrend.com/pssuq-post-study-system-usability-questionnaire/>
- Vercel. (2025). Next.js. Disponível em:
<https://nextjs.org/>

Anexos

Anexo A

Questionário do Monitor de Manchas de Óleo (Primeira Fase de Testes)

O objetivo deste formulário é recolher feedback quantitativo e qualitativo sobre a primeira versão do Oil Spill Monitor. As respostas serão utilizadas para avaliar a usabilidade, identificar pontos de melhoria e orientar os próximos passos no desenvolvimento da aplicação.

Consentimento de participação

Confirmando que li e compreendi as informações sobre este estudo. Concordo que as minhas respostas anónimas possam ser utilizadas para fins de investigação académica. Compreendo que posso retirar-me em qualquer altura e solicitar a eliminação dos meus dados.

PSSUQ (Post-System Usability Questionnaire)

O objetivo desta primeira fase é avaliar quantitativamente a satisfação sentida pelo utilizador com a plataforma.

Utilize a escala de Concordo totalmente (1) a Discordo totalmente (7).

Se uma afirmação não se aplicar à sua experiência, pode deixá-la em branco.

- | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2. A utilização deste sistema foi simples | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 13. A interface deste sistema é agradável | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

Desafios e sugestões

Esta secção visa identificar as tarefas que foram consideradas mais difíceis ou pouco claras.

Selecione as tarefas em que se sentiu alguma dificuldade.

Em seguida, descreva o que poderia ser alterado ou melhorado na plataforma.

- 1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
- 2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desativa o ciclo dia/noite nas definições de textura
- 3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
- 4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
- 5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
- 6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
- 7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
- 8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
- 9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
- 10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Anexo B

1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desative o ciclo dia/noite nas definições de textura
3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Anexo C

1. Complete a visita guiada
2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e selecione a mancha de óleo disponível
3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Anexo D

- | | | | | | | | |
|--|---|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 2. A utilização deste sistema foi simples | 1 | 2 | 3 | 4 | <input checked="" type="radio"/> | 6 | 7 |
| 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | <input checked="" type="radio"/> | 6 | 7 |
| 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | <input checked="" type="radio"/> | 7 |
| 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários | 1 | 2 | 3 | 4 | <input checked="" type="radio"/> | 6 | 7 |
| 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 13. A interface deste sistema é agradável | 1 | 2 | 3 | 4 | <input checked="" type="radio"/> | 6 | 7 |
| 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |

- 1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
- 2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desative o ciclo dia/noite nas definições de textura
- 3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
- 4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
- 5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
- 6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
- 7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
- 8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
- 9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
- 10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Tornar as opções mais fáceis de encontrar. Incluir ajuda contextual/informação sobre a primeira utilização.

Anexo E

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 2 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 1 2 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 2 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 2 3 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 1 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 3 4 5 6 7

- 1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
- 2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desative o ciclo dia/noite nas definições de textura
- 3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
- 4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
- 5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
- 6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
- 7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
- 8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
- 9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
- 10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Não percebi o que era, nem notei qualquer alteração no "ciclo dia/noite". O ponto 9 não faz sentido se os pormenores forem sempre apresentados (assumindo que se trata do "Resumo da descarga") e a descarga não for clicável.

Anexo F

- | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2. A utilização deste sistema foi simples | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 13. A interface deste sistema é agradável | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

- 1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
- 2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desative o ciclo dia/noite nas definições de textura
- 3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
- 4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
- 5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
- 6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
- 7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
- 8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
- 9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
- 10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Quando se clica no botão "Todos os derrames de petróleo" para sair da vista detalhada, o mapa devia fazer zoom out para o globo. Como normalmente não há nada na área circundante depois de ocultar o derrame de petróleo, o mapa aparece preto e como se nada estivesse a carregar, e é preciso fazer muito zoom out até conseguir finalmente distinguir o mapa.

Anexo G

- | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|---|---|
| 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2. A utilização deste sistema foi simples | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara | 1 | 2 | 3 | <input checked="" type="radio"/> | 5 | 6 | 7 |
| 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava | 1 | 2 | <input checked="" type="radio"/> | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 13. A interface deste sistema é agradável | <input checked="" type="radio"/> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema | <input checked="" type="radio"/> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema | 1 | <input checked="" type="radio"/> | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

- 1. Aplique filtros, definindo uma área mínima de 40 km² e uma área máxima de 50 km²
- 2. Introduza a vista detalhada da maré negra selecionada e desative o ciclo dia/noite nas definições de textura
- 3. Ordene os resultados por área crescente e selecione o derrame de petróleo com a área mais baixa
- 4. Inicie a linha de tempo clicando em reproduzir e, em seguida, selecione o último momento disponível (movendo o globo, se necessário)
- 5. Regresse à página de listagem das manchas de óleo
- 6. Selecione qualquer momento disponível na linha temporal e procure pela mancha de óleo correspondente (movendo o globo, se necessário)
- 7. Faça zoom no globo para observar melhor a região afetada
- 8. Clique em reproduzir para acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo
- 9. Clique na mancha de óleo no globo para aceder à sua vista detalhada
- 10. Repita o processo de visualização temporal descrito na Tarefa 8

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Adicionar um botão para redirecionar automaticamente para as manchas de óleo em curso na cronologia.

Anexo H

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 2 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 3 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 2 3 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 2 3 4 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 1 2 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 4 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 2 3 4 5 6 7

- 1. Completa a visita guiada
- 2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e seleccione a mancha de óleo disponível
- 3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
- 4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
- 5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
- 6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
- 7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
- 8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
- 9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
- 10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Tornar as definições mais óbvias ou apresentar a opção logo no início.

Anexo I

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 3 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 2 3 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 3 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 3 4 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 2 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 4 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 3 4 5 6 7

- 1. Completa a visita guiada
- 2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e seleccione a mancha de óleo disponível
- 3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
- 4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
- 5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
- 6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
- 7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
- 8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
- 9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
- 10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

O guia inicial devia ser obrigatório e mais pormenorizado para que o utilizador saiba onde se encontram as opções e as funcionalidades.

Anexo J

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 2 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 3 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 2 3 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 2 3 4 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 1 2 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 4 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 2 3 4 5 6 7

- 1. Completa a visita guiada
- 2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e seleccione a mancha de óleo disponível
- 3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
- 4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
- 5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
- 6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
- 7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
- 8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
- 9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
- 10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Tentei clicar na mancha de óleo para ver se mudava alguma coisa, mas depois encontrei as definições. Eu tentaria torná-la mais óbvia ou deslocá-la.

Anexo K

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 2 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 3 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 2 3 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 2 3 4 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 1 2 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 4 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 2 3 4 5 6 7

- 1. Completa a visita guiada
- 2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e seleccione a mancha de óleo disponível
- 3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
- 4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
- 5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
- 6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
- 7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
- 8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
- 9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
- 10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Há muitas coisas e é difícil perceber o que posso fazer e leva algum tempo a habituar-me.

Anexo L

- 1. De um modo geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 2. A utilização deste sistema foi simples 1 2 3 4 5 6 7
- 3. Consegui completar as tarefas e os cenários rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 4. Senti-me confortável ao utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 5. Foi fácil aprender a utilizar este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 6. Penso que posso tornar-me produtivo rapidamente com este sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 7. O sistema apresentava mensagens de erro que me diziam claramente como resolver os problemas 1 2 3 4 5 6 7
- 8. Sempre que cometia um erro ao utilizar o sistema, conseguia recuperar fácil e rapidamente 1 2 3 4 5 6 7
- 9. A informação de ajuda fornecida com este sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 10. Foi fácil encontrar as informações de que precisava 1 2 3 4 5 6 7
- 11. A informação foi eficaz para me ajudar a completar as tarefas e os cenários 1 2 3 4 5 6 7
- 12. A organização da informação nos ecrãs do sistema era clara 1 2 3 4 5 6 7
- 13. A interface deste sistema é agradável 1 2 3 4 5 6 7
- 14. Gostei de utilizar a interface deste sistema 1 2 3 4 5 6 7
- 15. Este sistema tem todas as funções e capacidades que eu esperava que tivesse 1 2 3 4 5 6 7
- 16. De um modo geral, estou satisfeito com este sistema 1 2 3 4 5 6 7

- 1. Completa a visita guiada
- 2. Filtra os dados com uma duração mínima de 2000 minutos e seleccione a mancha de óleo disponível
- 3. Altere a representação dos dados de "pontos" para "manchas"
- 4. Aplique uma velocidade de reprodução de 2x na linha de temporal e reproduza
- 5. Verifique se a direção da mancha corresponde à estatística da direção mediana
- 6. Mova à volta do globo e encontre a opção para regressar a mancha de óleo atual
- 7. Regressa à página de listagem das manchas de óleo
- 8. Aumente o número de manchas de óleo visíveis na tabela
- 9. Aplique um filtro de intervalo de datas (por exemplo, de 1 a 15 de janeiro)
- 10. Clique em qualquer mancha de óleo e remova as legendas nas opções

Se pudesse mudar uma coisa, o que é que mudaria?

Durante a reprodução, poderia mostrar visualmente a direção e permitir mover o globo, o que não acontece. Poderia ter um indicador visual quando se perde a posição da mancha.