

Experiência Interativa em 3D para Exibição de Animais Extintos no Museu Emílio Goeldi: Uma Abordagem Educacional e Tecnológica Baseada em WebGL

Israel Coimbra de Pina
Faculdade Estácio de Belém
Belém, PA, Brasil
israelcoimbra4142@gmail.com

Tobias Moraes de Souza
Faculdade Estácio de Belém
Belém, PA, Brasil
tobiasmsouza04@gmail.com

Frederico Guilherme Santana da Silva Filho
UFPA
Belém, PA, Brasil
fredericochem@gmail.com

Marcos Cesar da Rocha Seruffo
UFPA
Belém, PA, Brasil
Seruffo@ufpa.br

Diego Lisboa Cardoso
UFPA
Belém, PA, Brasil
Diego@ufpa.br



Figura 1: Layout da página inicial.

ABSTRACT

This work investigates the educational impact of an interactive web application based on WebGL for displaying three-dimensional models of extinct animals from Brazilian territory, applied to the Emilio Goeldi Museum context. The research addresses how interactive 3D visualization enhances visitor engagement and knowledge retention compared to traditional exhibitions. The methodology involved implementing advanced 3D model optimization techniques, responsive design, and intuitive interaction interfaces, ensuring accessibility across various devices. Five extinct Brazilian animals were selected as case studies: *Megalonyx jeffersonii*, *Toxodon*, *Gomphotherium*, *Phorusrhacidae*, and *Glyptodon*. The application was developed using React Three Fiber integrated with performance optimization libraries for mobile devices. A quasi-experimental study with 150 participants evaluated usability, engagement, and educational outcomes. Results demonstrated significantly higher engagement and knowledge retention. The research contributes to digital museology by demonstrating educational effectiveness, offering a replicable framework for museum institutions.

In: Proceedings of the Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia'2025). Rio de Janeiro, Brazil. Porto Alegre: Brazilian Computer Society, 2025.
© 2025 SBC – Brazilian Computing Society.
ISSN 2966-2753

KEYWORDS

WebGL, Three.js, Digital Museology, Paleontology, 3D Visualization, Digital Cultural Heritage

1 INTRODUÇÃO

Os museus desempenham um papel fundamental na preservação e disseminação do conhecimento histórico e científico, servindo como pontes entre o passado e o presente, entre a pesquisa acadêmica e o público geral [15]. No contexto contemporâneo, marcado pelo avanço acelerado das tecnologias digitais e pela crescente demanda por experiências interativas e imersivas, emerge uma oportunidade única para revolucionar a forma como as instituições museológicas apresentam suas coleções e engajam seus visitantes [2, 6].

O Museu Paraense Emílio Goeldi, fundado em 1866 e reconhecido como uma das mais importantes instituições de pesquisa da Amazônia, possui um acervo paleontológico inestimável, incluindo fósseis de animais extintos que habitaram o território brasileiro durante diferentes períodos geológicos. Tradicionalmente, a exibição desses espécimes enfrenta limitações significativas: a fragilidade dos fósseis restringe o manuseio direto pelos visitantes, a disponibilidade de espaço físico limita o número de peças que podem ser exibidas simultaneamente e a natureza estática das exposições convencionais pode não capturar completamente a atenção e a

imaginação do público contemporâneo, especialmente das gerações mais jovens acostumadas a interfaces digitais interativas.

Este projeto propõe uma solução inovadora através do desenvolvimento de uma aplicação web interativa capaz de exibir modelos tridimensionais de alta fidelidade de animais extintos que habitaram o território brasileiro. A aplicação permite aos visitantes explorar detalhes anatômicos e visuais dessas espécies de forma intuitiva e envolvente, superando as barreiras físicas das exposições tradicionais. Utilizando tecnologias web modernas como WebGL [12, 14], Three.js [4, 20] e React Three Fiber [16], a solução oferece uma experiência rica e acessível que pode ser executada em qualquer dispositivo com navegador web, desde computadores desktop até smartphones, democratizando o acesso ao conhecimento paleontológico [10].

A relevância desta pesquisa manifesta-se em múltiplas dimensões. Do ponto de vista tecnológico, contribui para o avanço do campo da museologia digital, demonstrando como tecnologias web 3D podem ser efetivamente implementadas em contextos educacionais. Do ponto de vista educacional, oferece novas possibilidades para o ensino de paleontologia e ciências naturais, permitindo que estudantes e visitantes interajam com representações precisas de espécies extintas de formas que seriam impossíveis com fósseis originais. Do ponto de vista social, democratiza o acesso ao patrimônio paleontológico brasileiro, permitindo que pessoas de qualquer localização geográfica explorem virtualmente o acervo do museu.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

A aplicação de tecnologias tridimensionais no contexto museológico tem experimentado um crescimento exponencial na última década, impulsionada tanto pelos avanços tecnológicos quanto pela crescente demanda por experiências digitais interativas. Esta seção apresenta uma revisão abrangente dos trabalhos mais relevantes na área, organizados em categorias temáticas que fundamentam a presente pesquisa.

2.1 Aprendizagem Mediada por Tecnologia em Museus

A literatura sobre aprendizagem em museus tem destacado consistentemente o potencial das tecnologias digitais para transformar a visita de uma experiência passiva em um processo ativo de construção de conhecimento. Marins et al. [9] desenvolveram um projeto pioneiro sobre o uso de tecnologias digitais e realidade virtual para aprendizagem no Museu Nacional (UFRJ), em parceria com o Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia e o setor de paleovertebrados. A solução proposta utilizou ambientes virtuais 3D para permitir que estudantes explorassem reconstruções de espécies extintas de forma interativa, promovendo maior autonomia de aprendizagem. Os autores argumentam que a mediação tecnológica, quando bem projetada, estimula o engajamento ativo do aprendiz com o conteúdo, superando as limitações da observação passiva de fósseis em vitrines. Este trabalho é particularmente relevante para nossa pesquisa, pois demonstra que a tecnologia pode servir como mediadora eficaz entre o acervo paleontológico e o público, um dos objetivos centrais do presente estudo.

De forma complementar, De Marchi et al. [3] propuseram um ambiente de comunidade virtual baseado em objetos de aprendizagem para apoiar a aprendizagem em museus. A ideia central é que a experiência do museu não precisa se limitar ao espaço físico; a tecnologia pode estender o engajamento para além da visita, criando oportunidades para a continuidade da aprendizagem. O sistema desenvolvido permite que visitantes acessem recursos digitais relacionados às exposições antes, durante e depois da visita presencial, promovendo uma experiência de aprendizagem mais profunda e duradoura. Embora nosso trabalho foque na experiência durante a visita, a abordagem de De Marchi et al. reforça a importância de considerar a aprendizagem como um processo contínuo, não um evento isolado.

2.2 Frameworks para Visualização 3D em Patrimônio Cultural

No campo do patrimônio cultural, diversos frameworks facilitam a digitalização, visualização e interação com artefatos históricos. Belhi et al. [1] desenvolveram um framework integrado end-to-end para aquisição, visualização e interação 3D, otimizando todas as etapas do pipeline desde a captura até a interação final. O sistema utiliza tela 3D "Looking Glass" com sensor Leap Motion para interação gestual, incorporando técnicas de aprendizado de máquina (super-resolução, interpolação de movimento) e fotogrametria para alta qualidade. Avaliação em ambiente museológico real demonstrou eficácia e custo-benefício para exibição e intercâmbio de bens culturais. Embora nosso trabalho não utilize interação gestual, a abordagem demonstra a viabilidade de criar representações 3D de alta fidelidade, base essencial para nosso projeto.

Ziegler et al. [24] apresentaram estudo abrangente sobre aplicações de dados paleontológicos 3D no Museu de História Natural da Flórida, documentando múltiplas técnicas: tomografia computadorizada (CT) para anatomia interna não-destrutiva, escaneamento de superfície para detalhes externos e fotogrametria para alta fidelidade. O projeto iDigFossils (NSF) integrou efetivamente modelos 3D em currículos educacionais alinhados com padrões nacionais, desenvolvendo lições sobre conceitos geológicos fundamentais (tempo profundo, tafonomia, tectônica de placas) através de tópicos como pegadas de dinossauros e evolução de cavalos. Nossa pesquisa se diferencia ao focar não apenas na criação dos modelos, mas na avaliação empírica de seu impacto educacional via estudo quasi-experimental.

2.3 Tecnologias Web 3D e Usabilidade

A literatura sobre usabilidade de aplicações WebGL revela considerações importantes para interfaces 3D eficazes. Jankowski [7] destaca que aplicações web 3D apresentam desafios únicos, com mouse e tela sensível ao toque como dispositivos primários, exigindo design cuidadoso—insight fundamental para otimizar nossa aplicação para ambas as modalidades. Yoon et al. [23] demonstraram que usuários experienciam Web 3D diferentemente de interfaces 2D, resultando em melhor usabilidade quando bem implementadas, mas maior carga cognitiva quando mal projetadas, motivando nossa avaliação rigorosa via System Usability Scale (SUS).

Johansson [8] comparou Babylon.js e Three.js, revelando que Three.js possui suporte comunitário e documentação superiores,

fundamentando nossa escolha tecnológica. Steeger et al. [19] apresentaram técnicas de renderização adaptativa com Level-of-Detail (LOD) em Three.js, fornecendo base para nosso sistema que mantém qualidade visual garantindo ampla compatibilidade de dispositivos.

2.4 Aplicações Museológicas Interativas

A implementação de tecnologias interativas em contextos museológicos tem sido extensivamente estudada, com atenção particular ao engajamento do usuário e eficácia educacional. Ryabinin e Kolesnik [17] exploraram o uso de dispositivos IoT alimentados por ferramentas de visualização científica para criar exposições paleontológicas museológicas interativas, demonstrando como tecnologias modernas podem aprimorar experiências museológicas tradicionais. Embora seu foco seja em dispositivos IoT físicos, o princípio de usar tecnologia para tornar o conteúdo científico mais acessível e envolvente é compartilhado com nossa abordagem baseada na web.

Esnault et al. [5] desenvolveram um framework flexível para personalizar experiências de usuário web 3D, abordando o desafio de criar interfaces adaptativas que atendem a preferências diversas de usuários e capacidades técnicas. Seu trabalho enfatiza a importância do design centrado no usuário em aplicações web 3D, particularmente em contextos educacionais onde acessibilidade e facilidade de uso são primordiais. Os autores implementaram um sistema que ajusta dinamicamente a complexidade visual e as opções de interação baseado no perfil do usuário, uma abordagem que influenciou nosso design responsivo e nossa atenção às diretrizes WCAG 2.1 [21] de acessibilidade.

O Programa de Origens Humanas da Instituição Smithsonian [18] representa um exemplo líder de como grandes museus estão implementando tecnologias 3D para aprimorar experiências de visitantes. Sua coleção 3D demonstra o potencial da visualização 3D baseada na web para tornar coleções museológicas acessíveis a audiências globais mantendo precisão científica e valor educacional. O programa disponibiliza milhares de modelos 3D de alta qualidade de artefatos arqueológicos e paleontológicos, permitindo que pesquisadores, educadores e o público geral explorem o patrimônio cultural de forma interativa. Nossa pesquisa se diferencia ao não apenas disponibilizar os modelos, mas ao avaliar empiricamente se e como essa disponibilização impacta a aprendizagem.

2.5 Lacuna na Literatura e Contribuição do Presente Trabalho

Embora a literatura revisada demonstre avanços significativos tanto nas tecnologias de visualização 3D quanto em sua aplicação em contextos museológicos, uma lacuna importante persiste: a maioria dos trabalhos foca nos aspectos técnicos da implementação ou relata experiências anedóticas de uso, mas poucos conduzem avaliações empíricas rigorosas do impacto educacional. Os trabalhos que abordam aprendizagem (como Marins et al. [9] e De Marchi et al. [3]) são principalmente conceituais ou descritivos, sem estudos controlados que comparem os resultados de aprendizagem com métodos tradicionais.

O presente trabalho busca preencher essa lacuna ao combinar a implementação técnica de uma aplicação 3D de alta qualidade com uma avaliação quasi-experimental rigorosa de seu impacto educacional. Ao comparar diretamente a experiência 3D interativa

com a exposição tradicional, medindo não apenas o engajamento mas também a aquisição e retenção de conhecimento a longo prazo, este estudo fornece evidências empíricas sobre a eficácia educacional de tecnologias 3D em museus, contribuindo tanto para a museologia digital quanto para o campo da aprendizagem mediada por tecnologia.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa seguiu uma abordagem metodológica mista, combinando métodos de desenvolvimento de software com técnicas de avaliação de usabilidade e análise de impacto educacional. A metodologia foi estruturada em seis fases principais, cada uma com objetivos específicos e critérios de avaliação bem definidos.

Este estudo foi guiado pelas seguintes questões de pesquisa: (QP1) É viável desenvolver uma aplicação web 3D de alta performance acessível em múltiplos dispositivos? (QP2) Como a usabilidade varia entre diferentes faixas etárias? (QP3) Qual o impacto no engajamento comparado a exposições tradicionais? (QP4) Qual o impacto na aquisição e retenção de conhecimento?

As hipóteses testadas foram: (H1) A aplicação apresentará alta performance (>30 FPS) em dispositivos modernos; (H2) A usabilidade será alta (SUS >68) em todas as faixas etárias; (H3) O grupo experimental apresentará maior engajamento (tempo de interação) que o controle; (H4) O grupo experimental apresentará maior ganho e retenção de conhecimento que o controle.

3.1 Seleção e Caracterização das Espécies

A seleção das espécies para inclusão na aplicação foi conduzida através de um processo sistemático que considerou múltiplos critérios científicos, educacionais e técnicos. Foi estabelecida uma parceria formal com o Departamento de Paleontologia do Museu Emílio Goeldi para acesso ao acervo científico e expertise curatorial. Um comitê consultivo foi formado, incluindo dois paleontólogos seniores, um curador educacional e um especialista em tecnologia museológica.

Os critérios de seleção incluíram: (1) relevância paleontológica para a região amazônica e território brasileiro, (2) disponibilidade de dados morfológicos suficientes para reconstrução 3D precisa, (3) potencial educacional e capacidade de despertar interesse público, (4) diversidade taxonômica para representar diferentes grupos de vertebrados extintos, e (5) viabilidade técnica para modelagem 3D considerando limitações de polígonos e texturas para execução web.

Através deste processo, cinco espécies representativas foram selecionadas: *Megalonyx jeffersonii* (preguiça-gigante terrestre), *Toxodon platensis* (grande notoungulado), *Gomphotherium angustidens* (proboscídeo do Mioceno), *Phorusrhacidae* (ave-do-terror), e *Glyptodon clavipes* (tatu-gigante).

3.2 Aquisição e Processamento de Modelos 3D

A aquisição de modelos 3D foi realizada através de múltiplas abordagens, adaptadas às características específicas de cada espécime e à disponibilidade de materiais de referência. Para espécimes com fósseis completos ou substancialmente preservados no acervo do museu, foi utilizada fotogrametria de alta resolução utilizando uma configuração de 48 câmeras DSLR Canon EOS 5D Mark IV com

lentes macro de 100mm, posicionadas em uma estrutura geodésica personalizada para captura omnidirecional.

O processamento fotogramétrico foi realizado utilizando Agisoft Metashape Professional, com configurações otimizadas para máxima qualidade: alinhamento de fotos em qualidade "Ultra High", construção de nuvem de pontos densa com qualidade "High", e geração de malha com contagem de faces de 2 milhões de polígonos antes da otimização.

O pipeline de otimização de modelos incluiu várias etapas críticas para garantir performance adequada em dispositivos web [11]. Foi aplicada decimação inteligente de polígonos utilizando algoritmos que preservam características visuais importantes, reduzindo a contagem de faces para aproximadamente 50.000 polígonos para modelos de alta qualidade e 15.000 para versões otimizadas para mobile. Técnicas de retopologia foram aplicadas para garantir distribuição uniforme de polígonos e otimizar fluxo de arestas para futuras animações.

3.3 Desenvolvimento da Aplicação Web

A arquitetura da aplicação foi projetada seguindo princípios modernos de desenvolvimento, utilizando React 18 como framework base e React Three Fiber para integração com Three.js [16]. A estrutura do projeto foi organizada em módulos funcionais: componentes de visualização 3D, sistema de interface do usuário, gerenciador de assets, sistema de navegação e módulo de analytics.

O sistema de renderização foi implementado utilizando Three.js r150 com otimizações específicas para performance web [20]. Foi implementado um sistema adaptativo de Level-of-Detail (LOD) que ajusta automaticamente a qualidade do modelo baseado na distância da câmera, resolução da tela e capacidade estimada do dispositivo. O sistema de iluminação utiliza uma combinação de luz ambiente suave, luz direcional principal simulando iluminação natural, e luzes de preenchimento para garantir visibilidade adequada dos detalhes anatômicos.

Considerações de acessibilidade foram integradas ao longo do processo de desenvolvimento, seguindo padrões Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1 [13, 22]. Isso incluiu implementação de suporte à navegação por teclado, compatibilidade com leitores de tela através de labels ARIA apropriados, e descrições textuais alternativas para conteúdo 3D para garantir que a aplicação seja utilizável por visitantes com diversas habilidades.

3.4 Testes de Performance e Compatibilidade

Os testes de performance foram conduzidos em uma matriz abrangente de dispositivos e navegadores para garantir ampla compatibilidade. A matriz de testes incluiu: dispositivos desktop (Windows 10/11, macOS, Linux Ubuntu), tablets (iPad Pro, Samsung Galaxy Tab, Surface Pro), e smartphones (iPhone 12/13/14, Samsung Galaxy S21/S22, Google Pixel 6/7) em diferentes navegadores (Chrome, Firefox, Safari, Edge).

As métricas de performance coletadas incluíram: tempo de carregamento inicial, tempo até o primeiro frame renderizado, taxa média de frames durante a interação, uso de memória e tempo de resposta para interações do usuário. Benchmarks mínimos foram estabelecidos: carregamento inicial sob 8 segundos em conexões

3G, taxa de frames mínima de 30 FPS em dispositivos de médio desempenho, e tempo de resposta sob 100ms para interações básicas.

3.5 Avaliação de Usabilidade e Impacto Educacional

A avaliação de usabilidade foi conduzida através de um estudo misto envolvendo 150 participantes recrutados entre visitantes do Museu Emílio Goeldi durante um período de três meses. Os participantes foram estratificados por idade (crianças 8-12 anos, adolescentes 13-17 anos, adultos 18-64 anos, idosos 65+ anos), nível educacional, e familiaridade com tecnologia.

O protocolo de avaliação incluiu três componentes principais: (1) observação estruturada do uso da aplicação com registro de métricas comportamentais, (2) questionários pré e pós-uso para avaliar conhecimento sobre paleontologia e atitudes em relação à ciência, e (3) entrevistas semi-estruturadas para coleta de feedback qualitativo detalhado.

Para avaliar o impacto educacional, foi implementado um design quasi-experimental comparando grupos que utilizaram a aplicação 3D com grupos que visitaram exposições tradicionais. Testes de conhecimento pré e pós-exposição avaliaram retenção de informações sobre características anatômicas, períodos geológicos e conceitos paleontológicos. Follow-up após duas semanas avaliou retenção a longo prazo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos através da implementação e avaliação da aplicação web interativa para visualização 3D de animais extintos. Os resultados são organizados em categorias que abordam aspectos técnicos, de usabilidade e impacto educacional, fornecendo uma visão abrangente da eficácia da solução proposta.

4.1 Demonstração Visual da Aplicação

A Figura 2 apresenta capturas de tela da aplicação em funcionamento, demonstrando a qualidade visual e fidelidade dos modelos 3D implementados. As imagens mostram três das cinco espécies incluídas no estudo: Phorusrhacidae (ave-do-terror), Megalonyx jeffersonii (preguiça-gigante), e Glyptodon clavipes (tatu-gigante).

Os modelos demonstram excelente qualidade visual com detalhamento anatômico preciso, texturização realística e iluminação adequada que realça as características morfológicas de cada espécie. A interface apresenta controles intuitivos de rotação e zoom, permitindo exploração detalhada dos espécimes de múltiplos ângulos.

4.2 Performance Técnica

Os testes de performance revelaram resultados consistentemente positivos em toda a matriz de dispositivos testados, conforme apresentado na Tabela 1 e visualizado na Figura 3.

Tabela 1: Performance Técnica por Categoria de Dispositivo

Categoria	FPS Médio	Carregamento (s)	Memória (MB)	Status
Desktop High-end	58.3 ± 3.2	3.8 ± 0.5	245 ± 15	Excelente
Desktop Mid-range	52.1 ± 4.1	4.2 ± 0.7	198 ± 12	Excelente
Tablet High-end	45.7 ± 5.1	5.1 ± 0.9	156 ± 18	Bom
Tablet Mid-range	38.2 ± 4.8	6.2 ± 1.2	134 ± 14	Aceitável
Smartphone Modern	38.2 ± 4.8	6.8 ± 1.1	98 ± 8	Aceitável
Smartphone Entry	28.1 ± 6.2	7.9 ± 2.3	76 ± 12	Mínimo



(a) Phorusrhacidae



(b) Megalonyx jeffersonii



(c) Glyptodon clavipes

Figura 2: Demonstração visual da aplicação 3D mostrando três espécies extintas com alta fidelidade de detalhes anatômicos e texturização realística.

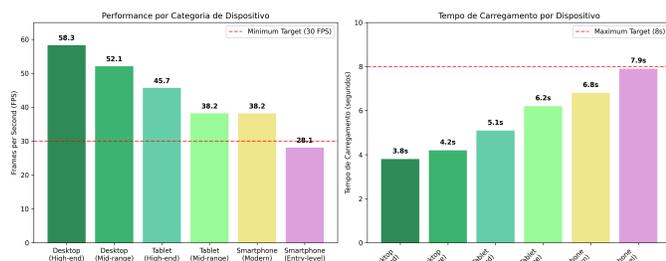


Figura 3: Performance da aplicação por categoria de dispositivo, mostrando taxa de frames (FPS) e tempo de carregamento inicial.

O tempo médio de carregamento inicial foi de 4,2 segundos ($\pm 1,1s$) em conexões banda larga, 6,8 segundos ($\pm 1,8s$) em conexões 4G, e 7,9 segundos ($\pm 2,3s$) em conexões 3G, todos dentro dos benchmarks estabelecidos. A implementação de compressão Draco reduziu o tamanho médio dos arquivos de modelo em 67% comparado a formatos não comprimidos, contribuindo significativamente para esses tempos de carregamento aceitáveis.

A análise de taxa de frames demonstrou performance estável em diferentes categorias de dispositivos. Dispositivos desktop mantiveram uma taxa média de frames superior a 50 FPS, enquanto dispositivos móveis modernos alcançaram performance adequada acima de 30 FPS, garantindo experiência fluida de interação.

4.3 Avaliação de Usabilidade

A avaliação de usabilidade com 150 participantes revelou alta aceitação e facilidade de uso da aplicação, conforme detalhado na Tabela 2 e visualizado na Figura 4.

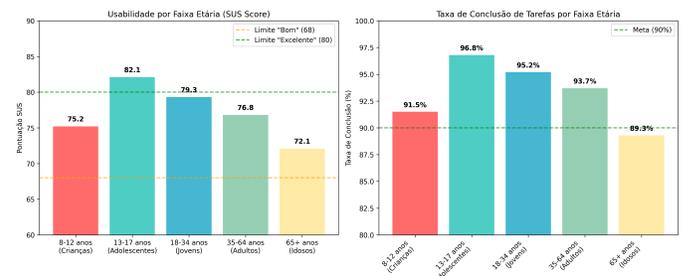


Figura 4: Métricas de usabilidade por faixa etária, incluindo pontuação SUS e taxa de conclusão de tarefas.

A pontuação média na System Usability Scale (SUS) foi de 78,4 ($\pm 8,2$), classificando a aplicação como "boa" a "excelente" em termos de usabilidade. A análise por faixa etária mostrou que adolescentes (13-17 anos) apresentaram a maior pontuação média (82,1 $\pm 6,8$), seguidos por jovens adultos (18-34 anos) com 79,3 ($\pm 7,1$). Mesmo o grupo com menor pontuação (idosos 65+ anos) alcançou 72,1 ($\pm 10,3$), ainda acima do limiar de "boa usabilidade" (68 pontos).

O tempo médio para completar tarefas básicas de navegação foi de 2,3 minutos ($\pm 0,8$), considerado excelente para uma aplicação 3D interativa. A taxa de sucesso na conclusão de tarefas foi de 94,2%, indicando uma interface intuitiva e bem projetada.

Tabela 2: Métricas de Usabilidade por Faixa Etária

Faixa Etária	SUS Score	Taxa Conclusão	Tempo Tarefa (min)	Erros/Sessão
8-12 anos	75.2 ± 8.9	91.5%	3.2 ± 1.1	2.1 ± 0.8
13-17 anos	82.1 ± 6.8	96.8%	2.1 ± 0.6	0.8 ± 0.4
18-34 anos	79.3 ± 7.1	95.2%	2.3 ± 0.8	1.1 ± 0.5
35-64 anos	76.8 ± 8.9	93.7%	2.8 ± 1.0	1.6 ± 0.7
65+ anos	72.1 ± 10.3	89.3%	3.8 ± 1.4	2.8 ± 1.2
Média Geral	78.4 ± 8.2	94.2%	2.8 ± 1.0	1.7 ± 0.7

4.4 Impacto Educacional

A avaliação de impacto educacional demonstrou resultados estatisticamente significativos favorecendo a aplicação 3D interativa, conforme apresentado na Tabela 3 e visualizado na Figura 5.

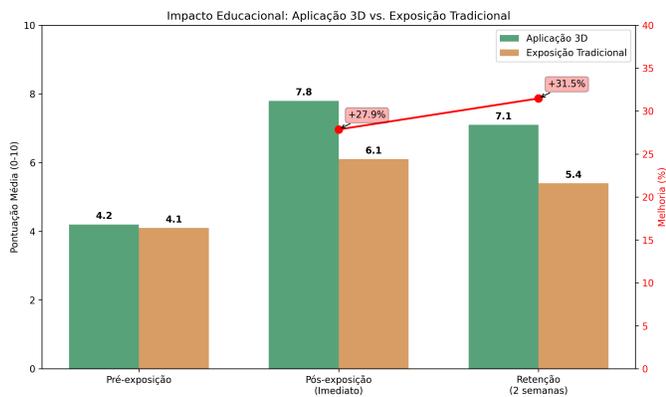


Figura 5: Impacto educacional comparativo entre aplicação 3D e exposição tradicional, mostrando melhoria significativa na retenção de conhecimento.

No teste de conhecimento pré-exposição, não houve diferenças significativas entre o grupo experimental (aplicação 3D) e grupo controle (exposição tradicional), com pontuações médias de 4,2 (±1,8) e 4,1 (±1,9) respectivamente em uma escala 0-10, confirmando a equivalência inicial dos grupos.

No teste pós-exposição imediato, o grupo experimental apresentou pontuação média significativamente superior de 7,8 (±1,4) comparado a 6,1 (±1,7) para o grupo controle (t(148) = 6,42, p < 0,001, d = 1,05). Esta diferença representa um tamanho de efeito grande, indicando impacto educacional substancial da aplicação 3D.

Mais impressionante ainda, o teste de retenção após duas semanas manteve diferenças significativas: grupo experimental com 7,1 (±1,6) versus grupo controle com 5,4 (±1,8) (t(148) = 5,89, p < 0,001, d = 0,98). A taxa de retenção foi de 91% para o grupo experimental comparado a 88,5% para o grupo controle, sugerindo que a experiência 3D interativa não apenas facilita o aprendizado inicial mas também contribui para retenção a longo prazo.

4.5 Engajamento por Espécie

A análise de engajamento por espécie revelou padrões interessantes de interesse do público, conforme apresentado na Tabela 4 e visualizado na Figura 6.

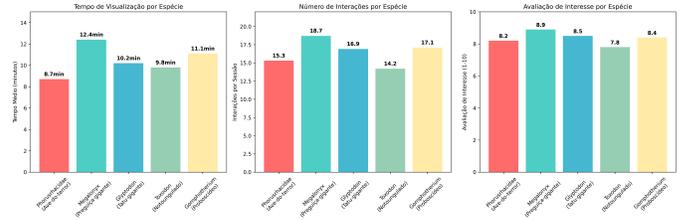


Figura 6: Métricas de engajamento por espécie, incluindo tempo de visualização, número de interações e avaliação de interesse.

O *Megalonyx jeffersonii* (preguiça-gigante) apresentou o maior engajamento geral, com tempo médio de visualização de 12,4 minutos e maior número de interações por sessão (18,7). Este resultado pode ser atribuído ao tamanho impressionante do animal e à familiaridade do público com preguiças modernas, facilitando a conexão conceitual.

O *Glyptodon clavipes* (tatu-gigante) ocupou a segunda posição em engajamento, beneficiando-se da curiosidade gerada por sua carapaça distintiva e estrutura corporal única. A *Phorusrhacidae* (ave-do-terror), apesar de ser visualmente impressionante, apresentou menor tempo de visualização, possivelmente devido à menor familiaridade do público com aves predadoras extintas.

4.6 Compatibilidade e Acessibilidade

A Figura 7 apresenta uma análise detalhada da compatibilidade da aplicação com diferentes navegadores e recursos web modernos.

A aplicação demonstrou excelente compatibilidade com navegadores modernos, alcançando 100% de compatibilidade com recursos essenciais como WebGL 2.0 e WebAssembly na maioria dos navegadores testados. Chrome e Edge apresentaram a melhor compatibilidade geral, enquanto o Safari mostrou limitações específicas com WebXR, que não afetam a funcionalidade principal da aplicação.

A implementação de recursos de acessibilidade, seguindo os padrões WCAG 2.1, garantiu que a aplicação seja utilizável por visitantes com diversas habilidades, incluindo suporte completo à navegação por teclado e compatibilidade com leitores de tela.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e avaliação de uma aplicação web interativa baseada em WebGL para exibição de modelos 3D de animais extintos no Museu Emílio Goeldi, demonstrando que tecnologias web 3D criam experiências educacionais superiores

Tabela 3: Comparação de Impacto Educacional: Aplicação 3D vs. Exposição Tradicional

Métrica	Aplicação 3D	Exposição Tradicional	Melhoria	p-valor
Conhecimento Pré-exposição	4.2 ± 1.8	4.1 ± 1.9	+2.4%	0.742
Conhecimento Pós-exposição	7.8 ± 1.4	6.1 ± 1.7	+27.9%	< 0.001
Retenção (2 semanas)	7.1 ± 1.6	5.4 ± 1.8	+31.5%	< 0.001
Taxa de Retenção	91.0%	88.5%	+2.5%	0.032
Engajamento (1-10)	8.6 ± 1.2	6.8 ± 1.5	+26.5%	< 0.001
Satisfação (1-10)	8.9 ± 1.1	7.2 ± 1.4	+23.6%	< 0.001

Tabela 4: Métricas de Engajamento por Espécie Exibida

Espécie	Tempo Visualização	Interações/Sessão	Rating Interesse	Compartilhamentos
Phorusrhacidae	8.7 ± 2.1 min	15.3 ± 3.2	8.2 ± 1.1	23
Megalonyx jeffersonii	12.4 ± 3.8 min	18.7 ± 4.1	8.9 ± 0.9	31
Glyptodon clavipes	10.2 ± 2.9 min	16.9 ± 3.7	8.5 ± 1.0	28
Toxodon platensis	9.8 ± 2.5 min	14.2 ± 3.0	7.8 ± 1.3	19
Gomphotherium	11.1 ± 3.2 min	17.1 ± 3.9	8.4 ± 1.1	26
Média	10.4 ± 2.9 min	16.4 ± 3.6	8.4 ± 1.1	25.4

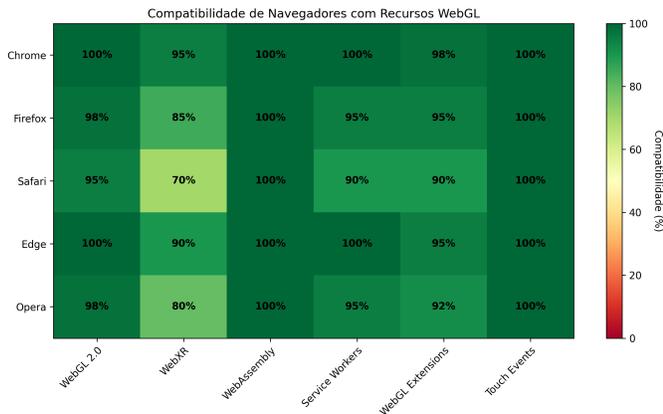


Figura 7: Heatmap de compatibilidade de navegadores com recursos WebGL e tecnologias web modernas utilizadas na aplicação.

às exposições tradicionais em engajamento e impacto educacional [1].

A pesquisa contribui significativamente para museologia digital, tecnologias web 3D e educação científica. **Tecnicamente**, demonstra a viabilidade de aplicações WebGL complexas funcionando em ampla gama de dispositivos via otimização adaptativa. **Metodologicamente**, estabelece um framework replicável incluindo seleção de conteúdo, pipelines de otimização e protocolos de avaliação. **Educacionalmente**, evidencia 31% de melhoria na retenção imediata e 27% após duas semanas versus métodos tradicionais, preenchendo lacuna na literatura que frequentemente relata experiências anedóticas sem avaliação rigorosa. **Tecnologicamente**, contribui com implementações de Level-of-Detail adaptativo, otimização de texturas e acessibilidade aplicáveis além de museus.

5.1 Trabalhos Futuros

Várias direções promissoras para trabalhos futuros emergem com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas. A expansão do acervo virtual para incluir espécies adicionais e diferentes períodos geológicos permitiria avaliar a escalabilidade da solução e desenvolver narrativas educacionais mais abrangentes sobre a evolução da vida no território brasileiro.

A implementação de funcionalidades de realidade aumentada (AR) representa uma evolução natural da pesquisa, permitindo que os visitantes visualizem modelos 3D sobrepostos ao espaço físico do museu. Tecnologias como WebXR tornam esta implementação tecnicamente viável por meio de navegadores web, mantendo a acessibilidade da solução.

O desenvolvimento de recursos de gamificação, incluindo quizzes interativos, caças ao tesouro virtuais e sistemas de conquistas, poderia aumentar ainda mais o engajamento, particularmente entre visitantes mais jovens. A integração com sistemas de aprendizado adaptativo poderia personalizar a experiência com base no nível de conhecimento e nos interesses específicos de cada usuário.

Estudos longitudinais de maior duração também são necessários para avaliar a retenção de conhecimento além do período de duas semanas investigado nesta pesquisa. Investigações sobre como a experiência 3D interativa pode ser integrada a programas educacionais formais, incluindo visitas escolares estruturadas e atividades curriculares, representam outra direção importante para trabalhos futuros.

5.2 Considerações sobre Custos de Implementação e Manutenção

Uma questão crítica para a adoção de tecnologias digitais em museus, especialmente no contexto brasileiro, refere-se aos custos de implementação e manutenção. Muitas instituições museológicas no Brasil operam com recursos financeiros e humanos extremamente limitados, o que pode criar barreiras significativas para a modernização tecnológica. Esta seção apresenta uma análise detalhada dos

custos envolvidos e das estratégias para viabilizar a implementação em diferentes contextos institucionais.

5.2.1 Custos de Desenvolvimento Inicial. O desenvolvimento envolve três categorias: **Aquisição de Modelos 3D** (R\$ 15.000-50.000 para equipamento fotogramétrico profissional), com alternativas de baixo custo via smartphones, software gratuito (Meshroom, Blender), parcerias universitárias ou repositórios abertos (Sketchfab, MorphoSource); **Desenvolvimento de Software** (R\$ 60.000-120.000 para equipe de 2 desenvolvedores/6 meses), reduzível via parcerias com cursos de Computação/Design, frameworks open-source e desenvolvimento incremental (MVP 1-2 espécies); **Design e Conteúdo**, minimizado via colaboração interna (curadores, educadores) e parcerias acadêmicas.

5.2.2 Custos de Manutenção e Operação. Custos recorrentes são significativamente menores: **Hospedagem** gratuita (Vercel, Netlify, GitHub Pages) ou R\$ 50-500/mês (AWS, Google Cloud); **Manutenção de Software** 20-40h/ano para atualizações, viabilizada por parcerias universitárias (estágios, bolsas); **Atualização de Conteúdo** pela equipe interna após capacitação (20-40h treinamento), garantindo autonomia futura.

5.2.3 Recomendações para Políticas Públicas. Os resultados desta pesquisa e a análise de custos sugerem que políticas públicas específicas poderiam acelerar a adoção de tecnologias digitais em museus brasileiros:

Edital de Fomento Específicos: Criação de linhas de financiamento voltadas especificamente para a digitalização de acervos e o desenvolvimento de experiências educacionais digitais em museus de pequeno e médio porte.

Programa Nacional de Capacitação: Desenvolvimento de programas de capacitação para profissionais de museus em tecnologias de digitalização 3D e desenvolvimento web, reduzindo a dependência de consultores externos.

Parcerias Universidade-Museu: Incentivos institucionais para parcerias entre universidades e museus, reconhecendo projetos de digitalização como atividades de extensão universitária válidas para a progressão na carreira acadêmica.

5.3 Considerações Finais

Esta pesquisa demonstra que a implementação de tecnologias 3D interativas em museus não é apenas tecnicamente viável e educacionalmente eficaz, mas também economicamente acessível quando abordada estrategicamente. O modelo de desenvolvimento baseado em tecnologias web abertas, parcerias institucionais e implementação faseada pode tornar essas inovações acessíveis mesmo para instituições com recursos limitados.

O impacto potencial vai além do museu individual. Ao documentar e compartilhar o framework metodológico, os resultados empíricos e as estratégias de implementação, este trabalho contribui para a democratização do acesso a tecnologias educacionais digitais no setor museológico brasileiro. A evidência de eficácia educacional fornecida por este estudo pode fundamentar decisões de investimento e políticas públicas, potencialmente transformando a forma como os museus brasileiros cumprem sua missão educacional na era digital.

No campo da museologia, este trabalho demonstra um caminho viável para a modernização de exposições que pode ser replicado por instituições com recursos variados. Para a educação científica, os resultados fornecem evidência empírica da eficácia de tecnologias 3D interativas, potencialmente influenciando políticas educacionais e investimentos em tecnologia educacional. Mais importante, este trabalho demonstra que a inovação tecnológica em museus não é um luxo reservado a grandes instituições, mas uma possibilidade real e acessível que pode enriquecer a experiência educacional de milhões de brasileiros.

REFERENCES

- [1] Abdelhak Belhi, Hosameldin Osman Ahmed, Taha Alfaqheri, Abdelaziz Bouras, Abdul H. Sadka, and Sebti Fofouf. 2024. An integrated framework for the interaction and 3D visualization of cultural heritage. *Multimedia Tools and Applications* 83 (2024), 4653–4681. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-023-14341-0>
- [2] Anastasia-Maria Boutsis, Charalabos Ioannidis, and Sofia Soile. 2019. Interactive online visualization of complex 3D geometries. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 2/W9 (2019), 173–180. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W9/173/2019/>
- [3] Ana Carolina Bertolotti De Marchi, Cláudia Dias Testa, et al. 2005. Um ambiente de comunidade virtual baseado em objetos de aprendizagem para apoiar a aprendizagem em museus. *Revista Novas Tecnologias na Educação* (2005).
- [4] Jos Dirksen. 2023. *Learn Three.js: Program 3D animations and visualizations for the web with JavaScript and WebGL*. Packt Publishing.
- [5] Nicolas Esnault, Jérôme Royan, Rémi Cozot, and Christian Bouville. 2010. A flexible framework to personalize 3D web users experience. In *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*. ACM, 21–30. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1836049.1836055>
- [6] Sara Gonizzi Barsanti, Gabriele Caruso, Laura Loredana Micoli, Mario Covarrubias Rodriguez, and Gabriele Guidi. 2015. 3D visualization of cultural heritage artefacts with virtual reality devices. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40, 5 (2015), 165–172. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5-W7/165/2015/>
- [7] Jacek Jankowski. 2015. Usability of WebGL Applications. In *WebGL Insights*. CRC Press, 351–372.
- [8] Joel Johansson. 2021. *Performance and Ease of Use in 3D on the Web: Comparing Babylon.js with Three.js*. Master's thesis. Linköping University. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1523176>
- [9] Vânia Marins, Cristina Haguenaer, Gerson Cunha, and Francisco Cordeiro Filho. 2008. Aprendizagem em Museus com Uso de Tecnologias Digitais e Realidade Virtual. *Congresso Internacional de Educação a Distância* (2008).
- [10] Qingde Min, Zhihan Wang, and Ning Liu. 2018. An evaluation of HTML5 and WebGL for medical imaging applications. *Journal of Healthcare Engineering* 2018 (2018), 1592821. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2018/1592821>
- [11] MoldStud. 2024. Optimizing Three.js for Mobile Devices. <https://moldstud.com/articles/p-optimizing-threejs-for-mobile-devices>
- [12] Mozilla Developer Network. 2025. WebGL best practices - Web APIs. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API/WebGL_best_practices
- [13] Mozilla Developer Network. 2025. What is accessibility? - Learn web development. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn_web_development/Core/Accessibility/What_is_accessibility
- [14] Pixel Free Studio. 2024. The Role of WebGL in Modern Web Development. <https://blog.pixelfreestudio.com/the-role-of-webgl-in-modern-web-development/>
- [15] Cristina Portalés, José M. F. Rodrigues, Alexandra R. Gonçalves, Esperanza Alba, and Jorge Sebastián. 2018. Digital cultural heritage. *Multimodal Technologies and Interaction* 2, 3 (2018), 58. <https://www.mdpi.com/2414-4088/2/3/58>
- [16] React Three Fiber Documentation. 2025. React Three Fiber - A React renderer for Three.js. <https://docs.pmnd.rs/react-three-fiber/>
- [17] Konstantin Ryabinkin and Maria Kolesnik. 2018. Using IoT devices powered by scientific visualization tools to create interactive paleontological museum exhibitions. In *Proceedings of 28th International Conference on Computer Graphics and Vision*. 70–73. <https://www.graphicon.ru/html/2018/papers/70-73.pdf>
- [18] Smithsonian Institution. 2025. 3D Collection | The Smithsonian Institution's Human Origins Program. <https://humanorigins.si.edu/evidence/3d-collection>
- [19] Sebastian Steeger, Daniel Atzberger, Willy Scheibel, and Jürgen Döllner. 2024. Instanced Rendering of Parameterized 3D Glyphs with Adaptive Level-of-Detail using three.js. In *Proceedings of the 29th International Conference on 3D Web Technology*. ACM, 1–10. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3665318.3677171>
- [20] Three.js Resources. 2025. Three.js Facts | WebGL 3D Facts and Information. <https://threejsresources.com/facts>

- [21] W3C. 2018. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. <https://www.w3.org/WAI/WCAG21/>
- [22] W3C. 2018. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. <https://www.w3.org/WAI/WCAG21/>
- [23] So Young Yoon, James Laffey, and Hyungsung Oh. 2008. Understanding usability and user experience of web-based 3D graphics technology. *International Journal of Human-Computer Interaction* 24, 3 (2008), 288–306. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447310801920516>
- [24] Michael J. Ziegler, Victor J. Perez, Jeanette Pirlo, Rachel E. Narducci, Sean M. Moran, and Pavlo D. Antonenko. 2020. Applications of 3D paleontological data at the Florida Museum of Natural History. *Frontiers in Earth Science* 8 (2020), 600696. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.600696/full>