

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA CELULAR

JÚLIO PANZERA GONÇALVES

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ENSINO -APRENDIZAGEM DE
BIOLOGIA CELULAR BASEADAS EM MULTISSENSORIALIDADE, REALIDADE VIRTUAL E
REALIDADE AUMENTADA PARA ALUNOS COM VISÃO TÍPICA E COM DEFICIÊNCIA
VISUAL NO ENSINO SUPERIOR**

Belo Horizonte

2025

JÚLIO PANZERA GONÇALVES

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ENSINO -APRENDIZAGEM DE
BIOLOGIA CELULAR BASEADAS EM MULTISSENSORIALIDADE, REALIDADE VIRTUAL E
REALIDADE AUMENTADA PARA ALUNOS COM VISÃO TÍPICA E COM DEFICIÊNCIA
VISUAL NO ENSINO SUPERIOR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular do Departamento de Morfologia, do Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Linha de Pesquisa: Educação Inclusiva em Ciências

Orientadora: Dra. Cleida Aparecida de Oliveira

Belo Horizonte

2025

043

Gonçalves, Júlio Panzera.

Desenvolvimento e aplicação de ferramentas de ensino-aprendizagem de biologia celular baseadas em multissensorialidade, realidade virtual e realidade aumentada para alunos com visão típica e com deficiência visual no ensino superior [manuscrito] / Júlio Panzera Gonçalves. – 2025.

193 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientadora: Dra. Cleida Aparecida de Oliveira.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular.

1. Biologia Celular. 2. Estratégias de Aprendizagem. 3. Aprendizagem Multi-Sensorial. 4. Deficiências da Visão. I. Oliveira, Cleida Aparecida de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. III. Título.

CDU: 576



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA CELULAR

ATA DE DEFESA DE TESE JÚLIO PANZERA GONÇALVES

Às **quatorze horas** do dia **28 de maio de 2025**, reuniu-se, no Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, a Comissão Examinadora da Tese, indicada pelo Colegiado do Programa, para julgar, em exame final, o trabalho final intitulado: **“DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE BIOLOGIA CELULAR BASEADAS EM MULTISSENSIBILIDADE, REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA, PARA ALUNOS COM VISÃO TÍPICA E COM DEFICIÊNCIA VISUAL NO ENSINO SUPERIOR”**, requisito final para obtenção do grau de Doutor em Biologia Celular. Abrindo a sessão, a Presidente da Comissão, **Cleida Aparecida de Oliveira**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato, para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição de resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

Prof./Pesq.	Instituição	Indicação
Cleida Aparecida de Oliveira	UFMG	Aprovado
Samyra Maria dos Santos Nassif	UFMG	Aprovado
Regina Céli Fonseca Ribeiro	UFMG – EEFFTO/NAI	Aprovado
Daniele Lisboa Ribeiro	UFU	Aprovado
Hernandes Faustino de Carvalho	UNICAMP	Aprovado

Pelas indicações, o candidato foi considerado: **Aprovado**

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pela Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. **Belo Horizonte, 28 de maio de 2025.**

Cleida Aparecida de Oliveira _____

Samyra Maria dos Santos
Nassif _____

Regina Céli Fonseca Ribeiro _____

Daniele Lisboa Ribeiro _____

Hernandes Faustino de Carvalho _____

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Cleida Aparecida de Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 29/05/2025, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniele Lisboa Ribeiro, Usuária Externa**, em 30/05/2025, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Celi Fonseca Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 02/06/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hernandes Faustino de Carvalho, Usuário Externo**, em 10/06/2025, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Samyra Maria dos Santos Nassif Lacerda, Professora do Magistério Superior**, em 10/06/2025, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4253181 e o código CRC 3D833502.

- *À minha mãe Sônia, cujo apoio e palavras de sabedoria me acompanham ao longo de toda minha trajetória.*
- *Aos meus tios André, Tânia, Telma, Paulina e Vicente pelo suporte nos momentos bons e nos difíceis.*
- *Às minhas avós Terezinha e Laudelina, minhas maiores fontes de inspiração.*
- *À minha orientadora Dra. Cleida Aparecida de Oliveira, por ter acreditado no meu potencial e por ter me apoiado sempre.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos por terem me apoiado durante todo o doutorado, oferecendo palavras de acalento nos momentos de dúvida.

Agradeço à equipe do Núcleo de Inclusão e Acessibilidade da Universidade Federal de Minas Gerais, em especial à diretora Regina Céli Fonseca Ribeiro e aos técnicos Anderson Martins Costa, Isabella Renata Alves Fernandes e Vera Lúcia Moreira Nunes, por terem oferecido suporte ao meu projeto, fornecendo os meios para sua realização.

Agradeço aos professores Aristóbolo Mendes da Silva, Luciana de Oliveira Andrade e Tânia Mara Segatelli por terem participado da revisão das ferramentas de aprendizagem que desenvolvemos, contribuindo imensamente para sua melhoria.

Agradeço às minhas colegas de laboratório Letícia Cardoso dos Santos e Elisângela Martins Santos pelo companheirismo durante a jornada.

Por fim, agradeço aos inúmeros estudantes para os quais ministrei aulas durante o doutorado pela confiança em mim depositada.

RESUMO

A Biologia Celular se ocupa da investigação dos aspectos funcionais, morfológicos, e bioquímicos das células, estruturas que correspondem à unidade básica da vida. Um dos principais desafios no seu ensino é desenvolver nos estudantes a habilidade de coletar, analisar, aplicar e sintetizar informações — competências essenciais para compreender conceitos biológicos simples e complexos. Essas dificuldades podem afetar todos os estudantes, que chegam ao ensino superior com diferentes níveis de aprendizagem, mas impactam especialmente estudantes com deficiência visual, que enfrentam, também, barreiras atitudinais, infraestrutura inadequada e escassez de abordagens metodológicas que favoreçam seus processos de aprendizagem. Com intuito de sobrepujar as dificuldades e obstáculos mencionados, este trabalho objetivou desenvolver, aplicar e validar diferentes estratégias, metodologias e ferramentas de aprendizagem de Biologia Celular. Inicialmente, foram implementadas abordagens pedagógicas baseadas em multissensorialidade e Design Universal para a Aprendizagem (DUA), visando reduzir lacunas de aprendizagem de um estudante cego matriculado em um curso de graduação da área da saúde. Também foram desenvolvidas ferramentas de aprendizagem de Biologia Celular apropriadas para estudantes com e sem deficiência visual, utilizando realidade virtual (RV) e aumentada (RA) e seguindo os princípios da pesquisa em design educacional (PDE). As estratégias multissensoriais resultaram em assimilação significativa dos conteúdos pelo estudante cego, aumento da participação em atividades em sala de aula, melhoria na comunicação oral, motivação e autoestima. Já a etapa de desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem resultou na criação de modelos tridimensionais (3D) incorporados às tecnologias de RA e RV. Estes modelos 3D foram hospedados em um site próprio da internet dotado de textos explicativos e parâmetros de acessibilidade (audiodescrições e interface de alteração de cores). Avaliações positivas de alunos com visão típica e com deficiência visual, além de professores de Biologia Celular de cursos de graduação da área da saúde e das biológicas revelaram que as ferramentas foram bem recebidas, proporcionando maior imersão e engajamento aos estudantes. Estes resultados demonstram que a implementação de abordagens inclusivas baseadas em multissensorialidade, RV e RA pode significativamente melhorar a aprendizagem de Biologia Celular para estudantes com visão típica e com deficiência visual. Além disso, evidenciam que, quando adequadamente implementadas, as estratégias de acessibilidade podem transformar o ensino superior em um espaço mais justo e igualitário para todos.

Palavras-chave: biologia celular; ensino; material didático; realidade virtual; realidade aumentada; inclusão

ABSTRACT

Cell Biology explores the functional, morphological, and biochemical aspects of cells, the fundamental units of life. One of the main challenges in teaching this subject is to develop students' ability to collect, analyze, apply, and synthesize information - essential skills for understanding simple and complex biological concepts. These challenges affect all students, who enter higher education with varying levels of prior knowledge, but they are particularly pronounced for students with visual impairments. In addition to academic obstacles, these students often encounter attitudinal barriers, inadequate infrastructure, and a lack of teaching methods tailored to their needs. To address these issues, this study aimed to develop, implement, and validate inclusive strategies, methodologies, and tools for teaching Cell Biology. The initial focus was on pedagogical approaches grounded in multisensory learning and Universal Design for Learning (UDL) principles, specifically designed to support a blind student enrolled in an undergraduate health sciences course. Cell Biology learning tools appropriate for students with and without visual impairments were also developed using virtual (VR) and augmented (AR) reality and following the principles of educational design research (EDR). The multisensory strategies resulted in significant assimilation of the content by the blind student, increased participation in classroom activities, improved oral communication, motivation and self-esteem. The tool development phase resulted in the creation of three-dimensional (3D) models enhanced with AR and VR, all hosted on a dedicated website featuring explanatory texts and accessibility features, such as audio descriptions and color-changing interface. Feedback from students - both with and without visual impairments - and from Cell Biology teachers from health and biological sciences indicated that the tools were well received, offering greater immersion and student engagement. These findings highlight that inclusive approaches based on multisensory strategies, VR and AR can significantly improve Cell Biology learning for all students. Furthermore, they underscore how well-designed accessibility measures can contribute to making higher education a more equitable and inclusive environment for everyone.

Keyword: cell biology; teaching; learning material; virtual reality; augmented reality; inclusion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ações previstas nos ciclos de design e redesign. 29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Objetos de estudo e subtemas de Biologia Celular incluídos no escopo deste projeto	36
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	-	Tridimensional
AR	-	Augmented Reality
BNCC	-	Base Nacional Comum Curricular
CAD	-	Centro de Atividades Didáticas de Ciências Naturais
CEP-UFMG	-	Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais
CNPq	-	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNS	-	Conselho Nacional de Saúde
DOI	-	Digital Object Identifier
DUA	-	Design Universal para a Aprendizagem
EDR	-	Educational Design Research
FAPEMIG	-	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
HTML	-	Hypertext Markup Language
ICB	-	Instituto de Ciências Biológicas
INEP	-	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
LABRE	-	Laboratório de Biologia da Reprodução
NAI	-	Núcleo de Acessibilidade e Inclusão
NEDUCOM	-	Núcleo de Educação e Comunicação em Ciências da Vida
PDE	-	Pesquisa em Design Educacional
QR	-	Quick Response
RA	-	Realidade Aumentada
RV	-	Realidade Virtual
TCLE	-	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TDICs	-	Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação
UDL	-	Universal Design for Learning
UFCSPA	-	Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre
UFMG	-	Universidade Federal de Minas Gerais
UNESCO	-	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VR	-	Virtual reality
W3C	-	World Wide Web Consortium (Consórcio World Wide Web)
WCAG	-	Web Content Accessibility Guidelines (Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo da Web)
WYSIWYG	-	What You See Is What You Get

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Aluno Participante)167

Apêndice B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Professor Participante) ..172

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Parecer Consubstanciado do Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG	177
---	-----

A presente tese de doutorado foi realizada no Laboratório de Biologia da Reprodução (LABRE), sediado no Departamento de Morfologia do Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sob a orientação da Dra. Cleida Aparecida de Oliveira, e contou com o auxílio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e da Pró-Reitora de Pós-Graduação da UFMG.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. A Biologia Celular no ensino superior	17
1.2. O ensino de Biologia Celular para alunos com deficiência visual	20
1.3. Multissensorialidade	22
1.4. Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação aplicadas aos processos de ensino - aprendizagem	23
1.4.1. Modelagem 3D	25
1.4.2. Realidade Virtual (RV)	26
1.4.2. Realidade Aumentada (RA)	27
1.5. Pesquisa em design educacional	28
1.6. Justificativa	30
2. OBJETIVOS	33
2.1. Objetivo Geral	33
2.2. Objetivos Específicos	33
3. METODOLOGIA GERAL	35
3.1. Aspectos Éticos	35
3.2. Delineamento Experimental	35
3.2.1. Detecção do Problema	35
3.2.2. Proposta de Solução	36
3.2.3. Planejamento	36
3.2.4. Criação das ferramentas de ensino -aprendizagem	38
3.2.5. Parcerias estabelecidas	38
4. ARTIGOS RESULTANTES	41
Artigo 1: Teaching Cell Biology to a student who is blind: promoting inclusion and teacher training in higher education	43
Artigo 2: Development, application and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes	76
Artigo 3: Desenvolvimento e validação de site inclusivo de ensino de Biologia Celular baseado em realidade virtual e realidade aumentada	104

5. DISCUSSÃO INTEGRADORA DOS RESULTADOS	147
6. CONCLUSÃO	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
APÊNDICE A - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (ALUNO PARTICIPANTE).....	167
Seção 1: Apresentação do projeto e esclarecimentos iniciais	167
Seção 2: Das atividades do projeto	168
Seção 3: Da proteção de seus dados e de outros aspectos éticos	169
Seção 4: Dos riscos de sua participação.....	170
Seção 5: Dos benefícios de sua participação	170
Seção 6: Do seu consentimento	171
APÊNDICE B - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (PROFESSOR PARTICIPANTE).....	172
Seção 1: Apresentação do projeto e esclarecimentos iniciais	172
Seção 2: Das atividades do projeto	173
Seção 3: Da proteção de seus dados e de outros aspectos éticos	174
Seção 4: Dos riscos de sua participação.....	175
Seção 5: Dos benefícios de sua participação	176
Seção 6: Do seu consentimento	176
ANEXO A - PARECER CONSUBSTANCIADO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA DA UFMG	177

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. A Biologia Celular no ensino superior

A Biologia Celular se ocupa da investigação dos aspectos funcionais, morfológicos, e bioquímicos das células, estruturas que correspondem à unidade básica da vida (ALBERTS *et al.*, 2017; GUPTA, 2009). Frequentemente também referido como Citologia, este campo do conhecimento representa uma excitante e versátil área de pesquisa, que por meio de avanços na compreensão de processos essenciais, como divisão, adesão e migração celular, continuamente colabora para o progresso científico (NATURE, 2019).

PAULO FREIRE (1988) reflete que “A práxis é transformação do mundo, é conquista de sujeitos que se encontram em colaboração para exercerem uma análise crítica sobre a realidade”. Sob esta ótica, a Biologia Celular é ferramenta de compreensão da ordem natural e, portanto, é também ferramenta de transformação do mundo, uma vez que conhecendo-o somos capazes de alterá-lo. Os avanços da sociedade afetam suas demandas, fazendo-se necessária, cada vez mais, a formação de indivíduos especializados em suprir as novas tendências do mercado. Esse fenômeno se reflete na segmentação do currículo em áreas específicas (WEBER, 2016) e também no ingresso de mais pessoas no ensino superior, cujos números aumentaram em todo o mundo de 19% para 38% entre os anos de 2000 e 2018 (UNESCO, 2020).

Ficam claras, portanto, as razões de a Biologia Celular compreender um requisito obrigatório na graduação, principalmente em cursos da área da saúde, que são diretamente influenciados pelos avanços nesse campo de conhecimento; e também em áreas afins (MONERAT; ROCHA, 2015). Esta indispensabilidade se deve, entre outros fatos, à importância do domínio de conceitos básicos e avançados em Biologia Celular pelo profissional que, uma vez graduado e ingressado no mercado de trabalho, fará uso de tais conceitos, direta ou indiretamente, de modo a desempenhar suas atividades profissionais.

A concepção da indispensabilidade da Biologia Celular também pode ser atribuída ao papel que a mesma tem no meio acadêmico e na sociedade, tendo em vista que muitos de seus conceitos básicos apresentam diversas aplicações e implicações no mundo real (BUDDE; WILLIAMS; MISTELI, 2012). NELSON e colaboradores (2010) ressaltam que a Biologia Celular compreende um campo propício para o estabelecimento de colaborações, uma vez que

permite que cientistas com diferentes formações interajam e contribuam para o entendimento dos comportamentos unicelulares e multicelulares.

No Brasil, o ensino de Biologia Celular é iniciado na escola básica. No ensino superior muitos dos conceitos introduzidos na etapa anterior são aprofundados, assim como outros são introduzidos. É sabido que a Biologia Celular é uma disciplina geralmente oferecida nos períodos iniciais dos cursos de graduação das áreas de saúde e ambiental, tendo em vista que é pré-requisito para completo aproveitamento de outras disciplinas como Histologia, Anatomia, Fisiologia, Genética, Imunologia, Patologia, dentre outras (MANTOVANI *et al.*, 2019). É também frequentemente oferecida no primeiro período, momento de adaptação dos estudantes aos novos desafios do ambiente universitário (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Um dos maiores desafios enfrentados pelos professores no ensino de Biologia Celular é desenvolver nos estudantes a capacidade de coletar, analisar, aplicar e sintetizar informações, muitas das quais são necessárias para abstrair conceitos biológicos básicos e complexos (GEHRING; EASTMAN, 2008). Com diferentes histórias pregressas, os estudantes ingressam no ensino superior com níveis de aprendizado distintos, fato que torna o ensino de Biologia Celular uma tarefa complexa. Muitos deles não estão familiarizados com imagens reais de células e são introduzidos à Biologia Celular por meio de desenhos e diagramas que não facilitam o entendimento sobre a estrutura ou a função celular (ARAÚJO-JORGE *et al.*, 2004). Ainda, não é incomum que estudantes se referiam à disciplina como complexa e permeada por termos e conceitos pouco familiares, além de integrar informações dos níveis molecular, celular e genético (AGRAWAL, 2022; DUDA; ADPRIYADI, 2020). Para MOURA e colaboradores (2013) é justamente essa complexidade dos temas que dificulta sua aceitação, principalmente quando atrelada à ausência de conhecimento prévio. Por fim, a dificuldade em visualizar as estruturas e os processos celulares acaba por tornar a aprendizagem frequentemente frustrante (SALGADO; GAUTÉRIO, 2020). Estas e outras percepções afetam o desempenho dos discentes e inclusive impactam sua permanência na graduação (TRACY *et al.*, 2022).

A sociedade vive uma era na qual as informações são transmitidas em velocidades nunca vistas. A atual geração de estudantes, conseqüentemente, apresenta diferentes requisitos e necessidades (Kouser; MAJID, 2021). As contínuas mudanças sociais e tecnológicas mantém os paradigmas educacionais em um constante estado de mudança (VESELINOVSKA; GUDEVA; DJOKIC, 2011). Bastante acostumados a esse contexto

tecnológico, os estudantes contemporâneos não se adaptam mais aos ambientes de aprendizagem passivos (PIFFERO *et al.*, 2020). Frequentemente se vem diante de aulas com escassa abordagem prática e que abrangem apenas o modelo tradicional de ensino, o que provoca queda em suas expectativas para com o curso (MANTOVANI *et al.*, 2019). Num cenário em que quadro e giz não são mais suficientes e diante da complexidade dos temas abordados em Biologia Celular, os quais dificultam a consolidação do aprendizado, faz-se necessária a busca e aplicação de novas estratégias pedagógicas (SANTIAGO; CARVALHO, 2020).

Diante dessa problemática, é preciso evocar o papel do professor na construção do conhecimento e de que forma ele pode reverter o quadro apresentado:

Desta forma, ser professor no século vinte e um, em qualquer nível de ensino, implica em repensar a todo o momento a sua prática, buscando metodologias que contribuam para ensinar seus alunos de maneira que desenvolvam, compreendam e internalizem os conteúdos, habilidades e competências necessárias em sua vida profissional (MONERAT; ROCHA, 2015, p. 28).

Em outras palavras, é preciso que os professores estejam em um processo contínuo de formação e transformação de sua prática, reelaborando os saberes que utilizam para suas aulas (SANTOS; SCHLÜNZEN; JUNIOR, 2016).

Muitas das reflexões acerca das metodologias de aprendizagem no ensino superior se baseiam em experiências de professores da educação básica, os quais se orientam pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que em uma de suas premissas aborda a necessidade do estímulo do protagonismo discente:

No Ensino Médio, a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias oportuniza o aprofundamento e a ampliação dos conhecimentos explorados na etapa anterior. Trata a investigação como forma de engajamento dos estudantes na aprendizagem de processos, práticas e procedimentos científicos e

tecnológicos, e promove o domínio de linguagens específicas, o que permite aos estudantes analisar fenômenos e processos, utilizando modelos e fazendo previsões. Dessa maneira, possibilita aos estudantes ampliar sua compreensão sobre a vida, o nosso planeta e o universo, bem como sua capacidade de refletir, argumentar, propor soluções e enfrentar desafios pessoais e coletivos, locais e globais (BRASIL, 2018, p. 474).

Indubitavelmente o protagonismo discente é uma prática que deve se estender a todos os níveis de ensino. Segundo VESELINOVSKA e colaboradores (2011), a aquisição do conhecimento exige esforços conscientes por parte dos estudantes, com intuito de alcançarem seus objetivos e interesses e tornarem-se competentes. Este processo envolve o desenvolvimento de habilidades por meio de atividades aplicadas e do uso de metodologias ativas, as quais são mais eficazes para a aprendizagem do que o estilo tradicional (KOLPIKOVA; CHEN; DOHERTY, 2019).

1.2. O ensino de Biologia Celular para alunos com deficiência visual

Segundo o Censo da Educação Superior, o número de alunos com deficiência, transtornos globais do desenvolvimento ou altas habilidades/superdotação regularmente matriculados em universidades brasileiras vem aumentando. Em 2013 havia 29.034 pessoas com deficiência, transtornos globais do desenvolvimento ou altas habilidades/superdotação matriculadas em universidades brasileiras, valor que representava 0,4% do total de matrículas em cursos de graduação. Em 2023, o número saltou para 92.756, valor que representa 0,9% do total de inscritos. Neste ano, dentre os matriculados, 23.112 declararam ter baixa visão, 4.276 declararam ter cegueira e 1.179 declaram ter surdo-cegueira (INEP - INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA, 2024).

Tal aumento é reflexo da aplicação de políticas públicas, muitas das quais abrangem desde o ensino básico e procuram garantir o acesso destes indivíduos às instituições regulares, superando ideias ultrapassadas de segregação e institucionalizando ações inclusivas no contexto educacional (CALDEIRA; FERREIRA, 2021; MENDONÇA *et al.*, 2021; SILVA, JAILMA CRUZ DA; PIMENTEL, 2021). Por exemplo, a Política Nacional de Educação Especial

na Perspectiva Inclusiva, instituída em 2008, procura garantir acesso e participação democrática de todos os estudantes aos diferentes níveis de ensino (BRASIL, 2008). Já a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência, de 2015, além de enfatizar o direito de acesso ao ensino, destaca a necessidade de assegurar igualdade de condições às pessoas com deficiência (BRASIL, 2015). Finalmente, a Lei nº.13.409, de 2016, estabelece a reserva de vagas nos cursos de nível médio e de nível superior nas instituições federais de ensino para pessoas com deficiência (BRASIL, 2016). Ainda que compreenda uma vitória, o crescimento do número de alunos com deficiência na educação superior, incluindo aqueles com deficiência visual, impõe novos desafios, uma vez que o processo de inclusão não está completamente consolidado nas instituições universitárias (SELAU; DAMIANI; COSTAS, 2017).

A deficiência visual inclui uma série de condições que afetam a capacidade de ver e interpretar informações visuais (NAIPAL; RAMPERSAD, 2018), as quais podem ser congênitas ou adquiridas (FINSTERER, 2003). A tabela de Snellen é um teste de acuidade visual bem conhecido que inclui a leitura de letras ou símbolos a uma distância fixa, geralmente 20 pés ou 6 metros. Nestas circunstâncias, a acuidade visual é expressa como uma fração, onde o numerador representa a distância de teste e o denominador indica a distância na qual uma pessoa com visão típica vê os mesmos detalhes (KNIESTEDT; STAMPER, 2003). A ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS - 2007, 2019) fornece um sistema de classificação para deficiência visual que se baseia tanto nos valores de acuidade visual da tabela de Snellen quanto no estreitamento (construção) do campo visual central. Consequentemente, para a OMS, a ausência de deficiência - também conhecida como visão típica - é definida como 20/20, uma acuidade considerada dentro dos padrões esperados para a função visual humana. Já o grupo de pessoas com deficiência visual moderada, também conhecidas como pessoas com baixa visão, têm acuidade visual menor que 6/18, mas igual ou melhor que 3/60, no olho melhor corrigido, incluindo percepção de luz ou um campo visual central de 20 graus. A cegueira, por sua vez, é subcategorizada de acordo com a capacidade do indivíduo de contar dedos e a percepção de luz. O primeiro nível de cegueira inclui pessoas com acuidade visual menor que 3/60 (ou 20/400). Este nível também inclui pessoas que podem contar dedos a uma distância de um metro ou têm acuidade visual de 1/60 (ou 20/1200). O segundo nível inclui pessoas que têm acuidade visual pior que 1/60 (ou 20/1200) e podem detectar a presença ou ausência de luz. Finalmente, o terceiro nível compreende cegueira total ou nenhuma percepção de luz.

Muitos são os desafios enfrentados por alunos com deficiência visual ao ingressar na universidade (GIN *et al.*, 2020; MARTINS; MELO; MARTINS, 2021). Frequentemente, esses estudantes são alvo de atitudes discriminatórias por parte de alunos e professores, as quais refletem a visão recorrente de que a deficiência representa um fator impeditivo para a aprendizagem. Além de prejudicar a participação e a integração no grupo, essas atitudes ajudam a sustentar um ambiente de exclusão (GETZEL; THOMA, 2008; KAUFFMAN *et al.*, 2022; MARSHAK *et al.*, 2010; RUBAN *et al.*, 2003). Para além disso, estudantes com deficiência visual frequentemente se deparam com instituições com espaços físicos inadequados, que criam barreiras ao seu deslocamento seguro (CROFT, 2020; GILSON; DYMOND, 2012; PEREIRA *et al.*, 2020), e com a escassez de abordagens metodológicas que favoreçam seus processos de aprendizagem (GIN *et al.*, 2020; LOVE *et al.*, 2014).

Diante deste cenário, é importante que o professor lance mão de diferentes abordagens de ensino, inclusive aquelas que priorizem as metodologias ativas, as quais fomentam o protagonismo discente e apresentam impacto significativo na aprendizagem quando implementadas de forma eficaz (KHAN *et al.*, 2017). Nesse sentido, procuramos, a partir desse projeto desenvolver ferramentas de aprendizagem de Biologia Celular que favoreçam a aprendizagem tanto de estudantes com visão típica quanto estudantes com deficiência visual. Com intuito de estabelecer oportunidades de aprendizagem igualitárias, desenvolvemos estratégias e ferramentas que se baseiam tanto em conceitos de multissensorialidade quanto na exploração de Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDICs).

1.3. Multissensorialidade

Pessoas com deficiência visual frequentemente se utilizam de outros sentidos, principalmente o tato e a audição, para aprender (LINTANGSARI; EMALIANA, 2020; PANDEY, 2018). A abordagem multissensorial, cuja proposta é combinar sentidos, vem se mostrando ainda mais eficiente que metodologias tradicionais de ensino, pois segundo CASTRO e colaboradores (2015), aumenta a capacidade de adquirir e assimilar informações.

As primeiras técnicas multissensoriais de aprendizagem remontam ao fim do século XIX e ao início do século XX. O físico e educador Édouard Séguin (1812 - 1880), por exemplo, desenvolveu técnicas de aprendizagem baseadas nos sentidos para crianças atípicas (ALVES;

MOCROSKY, 2022). Já Maria Montessori (1870 - 1952), em sua obra de 1912, introduziu diferentes metodologias de educação sensorial para crianças, fundamentadas na utilização das mãos e no princípio de que a exploração dos sentidos favorece a aquisição de conhecimento e o desenvolvimento de aptidões físicas e mentais (MONTESSORI, 1912).

Em seu trabalho de 2015, REYNAGA-PEÑA discorre sobre a importância dos modelos mentais no processo de aprendizagem. Para a autora, no ensino de Ciências a imagética compreende mais do que uma entidade perceptiva simples, pois carrega uma grande quantidade de conceitos e abstrações. Imagens mentais são, portanto, descrições visuais, espaciais, temporais e causais de objetos reais, objetos de conhecimento, pessoas e situações adquiridas por meio dos sentidos. O tato permite a extração e a codificação de informações e auxilia na criação de imagens mentais sem o uso de recursos visuais. Essa importante inferência demonstra que informações visuais podem ser substituídas por outras modalidades sensoriais, tal qual fazem pessoas com deficiência visual ao reconhecer objetos por meio do toque ativo.

Em diferentes etapas educacionais, a multissensorialidade permite que tanto alunos com deficiência visual quanto os alunos com visão típica se aproveitem das mesmas situações para aprender. Ao invés de simplesmente adaptar as metodologias vigentes para estudantes com deficiência, o que pode gerar lacunas nas interações com seus colegas (FERNÁNDEZ *et al.*, 2019), é fundamental adotar abordagens diversificadas que integrem diferentes sentidos e complementem-se mutuamente. A combinação de materiais táteis, bibliografia em braile e outros recursos didáticos acessíveis não apenas amplia as oportunidades de aprendizado sem necessidade de adaptações posteriores, mas também reduz barreiras que frequentemente levam ao abandono da graduação por estudantes com deficiência visual (SANT'ANNA *et al.*, 2016).

1.4. Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação aplicadas aos processos de ensino-aprendizagem

A Biologia Celular compreende um campo favorável para aplicação de diferentes ferramentas de aprendizagem, tendo em vista que trata de temáticas abstratas frequentemente permeadas por termos e conceitos complexos (BEAULIEU; PETIT-TURCOTTE, 2018). Frente à

necessidade de inovação dos processos educativos, o docente tem à sua disposição, além da multissensorialidade, outros recursos com capacidade de aperfeiçoar as atividades de ensino. Dentre elas, as ferramentas de aprendizagem que se aproveitam das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDICs).

As TDICs referem-se ao conjunto de tecnologias que envolvem a digitalização da informação mediada por dispositivos eletrônicos, como computadores, smartphones e tablets, e que, por meio da conexão com a internet, ampliam as possibilidades de comunicação (SIQUEIRA *et al.*, 2020; VALENTE, 2013). Da perspectiva das TDICs, portanto, a rede mundial de computadores se prova eficiente disseminadora da educação, uma vez que possibilita a hospedagem de diferentes recursos pedagógicos (LOBO; MAIA, 2015).

Cada vez mais as TDICs vêm sendo aplicadas na construção de ferramentas de ensino, uma vez que oferecem recursos e possibilidades de aprendizagem a partir de dispositivos comuns aos estudantes, como os computadores de mesa (desktops), notebooks, smartphones e tablets (SANTOS; SCHLÜNZEN; JUNIOR, 2016; VOLTOLINI, 2019).

Um obstáculo bastante comum ao desenvolvimento e aplicação de ferramentas de aprendizagem baseadas nas TDICs é a necessidade de investimento de tempo e de estudos na área para que o docente seja capaz de manipular TDICs mais complexas e aplicá-las no desenvolvimento de recursos didáticos digitais (DE BYL, 2009). Felizmente, a oferta de cursos, teleaulas, webinários e tutoriais neste segmento vem crescendo nos últimos anos. Além disso, o número de plataformas que ensinam a utilizar TDICs sem a necessidade de dominar linguagens de programação também vem aumentando. Existem plataformas que permitem a produção de sites inteiros, capazes inclusive de incorporar elementos tridimensionais (3D), imagens e vídeos sem que o interessado necessariamente conheça de HTML, a Linguagem de Marcação de Hipertexto (do inglês Hypertext Markup Language) que potencializa a maior parte das páginas da internet online nos dias de hoje (KANE; MAKUCH, 1998; SHARMA, 2018). Tais plataformas se baseiam principalmente nas tecnologias *What You See Is What You Get* (WYSIWYG), as quais fornecem um ambiente de construção em tempo real, cuja principal funcionalidade é disponibilizar uma visão do objeto em desenvolvimento muito similar ao resultado final que será obtido enquanto o mesmo ainda está sendo editado (DE BYL, 2009). Claramente, dominar linguagens de programação e softwares dedicados à construção de aplicativos potencializa a confecção de ferramentas de ensino baseadas em TDICs. Entretanto,

o conhecimento básico em informática associado às plataformas mais automatizadas já provê inúmeras possibilidades.

Tendo em vista que a utilização de tecnologias é satisfatória para os estudantes, a integração das TDICs nas aulas possibilita um processo de ensino-aprendizagem mais sistêmico e eficiente (Kouser; Majid, 2021). No ensino de Biologia Celular, essas tecnologias oferecem diversos benefícios, tornando o aluno protagonista de seu próprio aprendizado e incentivando a chamada aprendizagem horizontal, em que se privilegia a interação de estudantes com seus pares (Moran; Masetto; Behrens, 2013). Nesse contexto, a aplicação das TDICs se fortalece com o uso de ferramentas inovadoras, como a modelagem 3D, a realidade virtual (RV) e a realidade aumentada (RA). Essas tecnologias proporcionam experiências imersivas e interativas, favorecendo a visualização de estruturas celulares complexas e tornando o aprendizado mais dinâmico e inclusivo.

1.4.1. Modelagem 3D

A modelagem 3D envolve a criação de representações de objetos usando software especializado. Essa técnica é amplamente aplicada em vários setores, incluindo animação, jogos, arquitetura e design de produtos (Ghuge, 2023). No ensino de Biologia Celular, a utilização de modelos 3D tem se mostrado eficiente, pois permite que os estudantes estabeleçam conexões concretas entre a teoria e a estrutura física das células, promovendo um aprendizado ativo e significativo (Lazarowitz; Naim, 2013).

A efetiva aprendizagem de Biologia Celular exige a compreensão tanto da morfologia quanto das funções celulares. Nesse contexto, o manuseio de modelos 3D facilita a assimilação de suas características morfológicas e dos processos biológicos nos quais estão envolvidos (Lazarowitz; Naim, 2013). Ademais, segundo Duarte e Santos (2022, p. 5), "modelos biológicos como estruturas 3D ou semi-planas (alto-relevo) e coloridas são utilizadas como facilitadoras do aprendizado, complementando o conteúdo escrito. Também, a própria construção dos modelos faz com que os estudantes se preocupem com os detalhes intrínsecos dos modelos e a melhor forma de representá-los, revisando o conteúdo, além de desenvolver suas habilidades artísticas."

É sabido que os modelos 3D necessitam de interfaces que permitam aos usuários visualiza-los, manipula-los e explora-los de maneira direta. Nesse contexto, ambientes de RV e RA se destacam ao oferecer essas interfaces, criando espaços digitais interativos onde o usuário pode interagir de forma dinâmica com o modelo 3D (AL-ANSI *et al.*, 2023).

1.4.2. Realidade Virtual (RV)

A RV é uma tecnologia que renderiza, ou seja, constrói um ambiente que não existe em nosso espaço físico, mas que possui três dimensões nas quais o usuário é capaz de interagir com objetos ali inseridos pelo programador (BENNETT; SAUNDERS, 2019; CIPRESSO *et al.*, 2018; GIGANTE, 1993). Os objetos podem mudar ou responder quando manipulados, o que altera sua posição, formato ou comportamento (NETTO; MACHADO; OLIVEIRA, 2002). Esse é o princípio utilizado na confecção de jogos eletrônicos.

O ambiente de RV apresenta sete qualidades, as quais integradas, garantem que o usuário experimente uma realidade fora da sua própria: sintético (é gerado em tempo real, ou seja, não é uma gravação), tridimensional (deve permitir que o usuário se movimente e relacione seus movimentos com as dimensões de altura, largura e profundidade), multissensorial (deve incluir diferentes modalidades sensoriais, como a visual e a sonora), interativo (pode ser modificado pelo usuário em tempo real por meio de dispositivos de entrada, como teclado, mouse ou tela sensível ao toque), realístico (é povoado por objetos com representações precisas, próximas às dos objetos reais), imersivo (deve proporcionar a imersão por meio de dispositivos que capturam os movimentos do usuário, bem como reagir a eles) e presente (deve transmitir a sensação de que o usuário está dentro dele) (MORIE, 1994; REIS, 2019; VINCE, 2004).

As tecnologias que se aproveitam da RV e de modelos 3D vêm ganhando cada vez mais espaço nos últimos anos e têm se provado eficientes quando associadas ao ensino (CHAKER *et al.*, 2021; ENGLUND; OLOFSSON; PRICE, 2017). A RV permite que os alunos interajam, explorem e observem os objetos livremente, inclusive em diferentes ângulos (HU; WU; SHIEH, 2016). Essas funcionalidades favorecem a simulação de situações realistas e a exploração de conteúdos em níveis que não poderiam ser alcançados em cenários reais (DE BYL, 2009; TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). Além disso, são capazes de criar oportunidades de reflexão pelos

estudantes, levantando questionamentos relacionados aos seus próprios campos de interesse (MORO; VILLANOVA BIASUZ, 2020). O material 3D associado à RV pode ser ainda enriquecido e amparado por textos explicativos, que facilitam o entendimento das estruturas disponibilizadas. A associação de tais recursos possibilita a implementação de ambientes autorais facilmente editáveis e atualizáveis de acordo com as necessidades do docente, inclusive com intuito de abranger outros conteúdos.

Obviamente, a utilização destes recursos deve ser atrelada a um planejamento pedagógico que, além de mitigar a reprodução simples de conteúdos, vise também o desenvolvimento de novas competências por parte dos estudantes (AGRELLO; IMPAGLIAZZO; ESCOLA, 2019).

1.4.2. Realidade Aumentada (RA)

Enquanto a RV cria um ambiente para onde o usuário é transportado, na RA a experimentação virtual é acrescentada ao ambiente físico (KIRNER; KIRNER, 2011). Por meio de um dispositivo com software de RA instalado, o usuário pode interagir com objetos sobrepostos a um cenário real (AZUMA *et al.*, 2001; TURHAN; GÜMÜŞ, 2022). Esses objetos podem ser imagens, vídeos, modelos 3D ou até mesmo sons e músicas (VENKATESAN *et al.*, 2021).

Assim sendo, a RA modifica a realidade do usuário, adicionando-lhe camadas interativas ao mesmo tempo que obedece a princípios parecidos com os da RV. Entretanto, é obrigatório que o usuário porte um aparato capaz de processar imagens em tempo real e assim projetar sobre elas os elementos contidos dentro da RA (CARMIGNIANI *et al.*, 2011). A interação com esses objetos também se dá por dispositivos de entrada, como teclado, mouse e telas sensíveis ao toque. Entretanto, se o software de RA estiver instalado em equipamentos que possibilitem criar imagens em tempo real do próprio usuário, como webcams ou smartphones dotados de câmera, ele também poderá ser acrescentado ao cenário e será capaz de interagir a partir da voz, gestos e outros movimentos com o programa. Novas tecnologias de RA, inclusive, são capazes de rastrear traços fisionômicos do próprio usuário, submetendo-o a alterações previamente estabelecidas durante a programação.

A RA, portanto, oferece algumas vantagens quando comparada com a RV, uma vez que permite ao usuário interagir mais naturalmente com a tecnologia, sem necessidade de treinamento e adaptação e a partir de dispositivos populares com mais mobilidade que desktops (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). Sob a ótica educacional, a tecnologia RA consiste em uma alternativa atrativa e abrangente de aprendizagem (HOOG *et al.*, 2020), pois proporciona aos alunos novas oportunidades de interação, além de ser divertida e produtiva.

1.5. Pesquisa em design educacional

Em sua obra de 2010, Plomp e Nieveen (2010) descrevem o que chamam de pesquisa em design educacional (PDE), metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto:

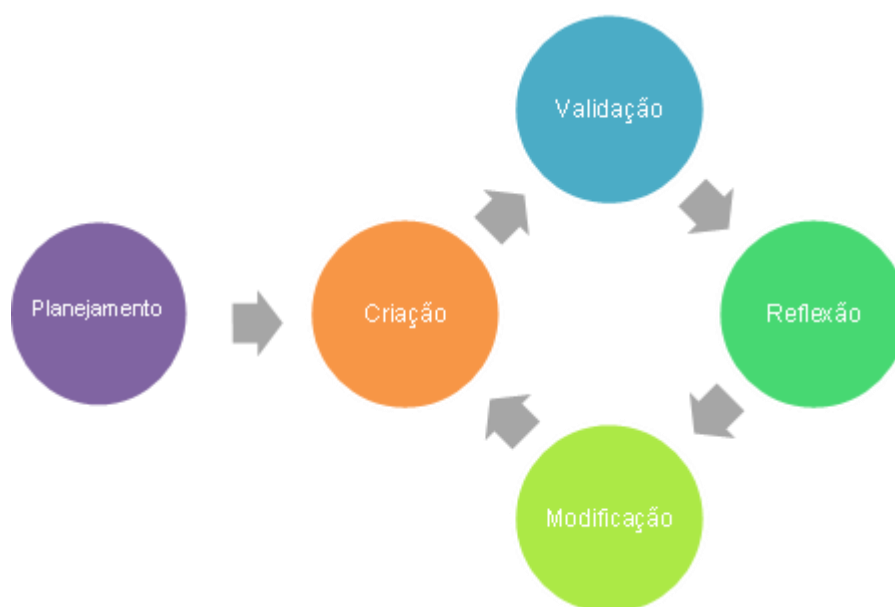
[...] a pesquisa em design educacional é o estudo sistemático do planejamento, desenvolvimento e avaliação de intervenções educacionais (programas, estratégias, materiais de ensino-aprendizagem, produtos e sistemas) como soluções para problemas complexos na prática educacional e que também visam avançar nosso conhecimento sobre as características dessas intervenções e os processos de concepção e desenvolvimento das mesmas (PLOMP; NIEVEEN, 2010, p. 13).

A PDE, portanto, se interessa em aliar investigação e desenvolvimento de produtos para atuarem na solução de problemáticas associadas aos processos de ensino e aprendizagem. Nesse sentido, cabe ao investigador delinear, desenvolver tais produtos e, simultaneamente, refletir sobre suas características, seus usos e suas repercussões (BARBOSA; OLIVEIRA, 2015). Com intuito de aperfeiçoar o produto, portanto, são necessários ciclos contínuos de design, implementação, análise e redesign.

A sistematização inerente à PDE envolve o cumprimento de algumas etapas bem definidas pelo pesquisador. A fase de “pesquisa preliminar” envolve o desenvolvimento do referencial conceitual e teórico para o estudo, a partir da análise do contexto e na revisão de literatura. “Prototipagem” é a fase de design segmentada em iterações ou microciclos de

pesquisa, cada um contando com reflexões que objetivam melhorar e aperfeiçoar o produto. Por fim, “validação” é a fase que procura determinar se o produto atende às especificações pré-determinadas. Esta fase pode resultar em recomendações para aperfeiçoamento do produto, fazendo-se necessário repetir as iterações com intuito de implementar as recomendações. O produto é modificado sucessivas vezes de modo a garantir sua eficácia em ciclos de design e redesign, definidos pelas ações elencadas na Figura 1 (BAUMGARTNER *et al.*, 2003; MCKENNEY; REEVES, 2012; PLOMP; NIEVEEN, 2010; SYAFRIAFDI *et al.*, 2019; VAN DEN AKKER *et al.*, 2006).

Figura 1 - Ações previstas nos ciclos de design e redesign.



Fonte: Autor (2025).

O ciclo de desenvolvimento de um produto educacional, portanto, segue passos semelhantes aos executados por um professor ao construir suas aulas. Por meio do planejamento, momento essencial da prática educativa, as atividades a serem desenvolvidas junto com os alunos são organizadas. Parte da organização consiste em delimitar o tema a ser abordado durante a ação didática, para que, em seguida, a metodologia que melhor se adeque ao tema seja selecionada. Durante essas etapas é fundamental que se considere os materiais e os conhecimentos adequados à realidade dos alunos, os recursos disponíveis, a duração

adequada dos trabalhos e os mecanismos de avaliação (FREIRE, 2000; LIBÂNEO, 1994; VASCONCELLOS, 2002).

1.6. Justificativa

Este trabalho justifica-se pela necessidade de atualizar as metodologias de ensino em cursos de graduação das áreas da saúde e das Ciências Biológicas, para que se utilizem cada vez mais de metodologias multissensoriais e dos constantes avanços tecnológicos contemporâneos. Além disso, ele oportuniza o desenvolvimento de alternativas pedagógicas que contemplem alunos com deficiência visual, integrando-os aos seus pares e mestres nos cursos de graduação e oferecendo oportunidades de aprendizagem inclusiva que fomentem seu pleno desenvolvimento e sua permanência no curso.

O desenvolvimento e aplicação das ferramentas e técnicas de aprendizagem que se aproveitam de recursos digitais e multissensorialidade, como aqui proposto, seguem uma tendência mundial de ampliação do uso de recursos interativos e tecnológicos para o ensino nos diversos níveis, incluindo em universidades. A Universidade de Cambridge, por exemplo, disponibiliza um modelo 3D interativo e gratuito que permite que os alunos explorem estruturas e processos subcelulares em detalhes (GURDON INSTITUTE, 2024). No Brasil, colaboradores da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA), por meio de projetos que integram professores e alunos de diferentes cursos da área da saúde, e utilizando técnicas de modelagem e impressão de estruturas celulares, viabilizam oportunidades inclusivas de ensino de Biologia Celular, Tecidual e Anatomia (DALL’SOTO *et al.*, 2018; MACHADO *et al.*, 2018; SILVA, RENATA VINADÉ DA *et al.*, 2018). Essas experiências bem-sucedidas demonstram o potencial de diferentes tecnologias digitais para o enriquecimento dos processos educativos. O projeto aqui descrito seguiu essa tendência, mas se diferencia por combinar de forma inédita recursos de multissensorialidade, RV e RA para oportunizar novas abordagens metodológicas para o ensino de Biologia Celular em cursos de graduação.

Este estudo é uma pesquisa-ação. Tais projetos se caracterizam por ter dois objetivos fundamentais: o objetivo prático, voltado para o levantamento de soluções para o objeto de estudo, e o objetivo de conhecimento, que intenciona ampliar as fronteiras científicas (CORRÊA; CAMPOS; ALMAGRO, 2018). Severino (2007) argumenta que além de compreender

a situação, a pesquisa-ação intenciona modificá-la, realizando um diagnóstico que permita aos atores aperfeiçoar suas práticas.

Ao estudar, desenvolver e aprimorar ferramentas didáticas baseadas em multissensorialidade, RV e RA, o autor pretende fomentar a discussão e a implementação de novas metodologias de aprendizagem para o ensino superior, na área de Biologia Celular, concretizar oportunidades de inclusão e compartilhamento das experiências adquiridas no percurso, oferecendo alternativas que visem alcançar o objetivo universal que é difundir o conhecimento científico.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular baseadas em multissensorialidade, RV e RA para alunos com visão típica e com deficiência visual no ensino superior.

2.2. Objetivos Específicos

- Confeccionar ferramentas de aprendizagem multissensorial com enfoque em Biologia Celular;
- Construir modelos 3D representativos da célula e sua organização subcelular, por meio de modelagem digital;
- Construir ferramentas de RV no contexto da célula e suas organelas;
- Construir ferramentas de RA no contexto da célula e suas organelas;
- Desenvolver um site onde possam ser implementadas e integradas as ferramentas de ensino-aprendizagem propostas;
- Aplicar as ferramentas de ensino-aprendizagem desenvolvidas, visando sua validação como facilitadoras do processo de ensino-aprendizagem de Biologia Celular;
- Compartilhar as experiências adquiridas com o desenvolvimento e aplicação das ferramentas propostas com os pares.

3. METODOLOGIA GERAL

3. METODOLOGIA GERAL

3.1. Aspectos Éticos

O projeto foi submetido à apreciação do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (CEP-UFMG) sob número de protocolo CAAE 68680723.7.0000.5149. A aprovação foi relatada no Parecer Consubstanciado n.º 6.206.003 emitido no dia 28 de julho de 2023. A íntegra deste documento encontra-se na seção de Anexos.

O presente estudo atende às normas estabelecidas na Resolução 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e respeita os critérios éticos necessários para inclusão de seres humanos em pesquisas científicas (BRASIL, 2012), os quais incluem a formalização de participação voluntária de estudantes e professores mediante assinatura em Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Cópias dos TCLEs desenvolvidos para alunos e professores participantes deste projeto foram também incluídas na seção de Anexos.

3.2. Delineamento Experimental

O presente projeto objetivou desenvolver e aplicar ferramentas de ensino-aprendizagem baseadas em multissensorialidade, RV e RA para criar oportunidades isonômicas de aprendizagem. Tendo em vista que juntas essas ferramentas procuram constituir produtos para auxiliar na aprendizagem de Biologia Celular, sua confecção está baseada em princípios da PDE e seguiu as seguintes etapas:

3.2.1. Detecção do Problema

Em diferentes níveis de ensino, é possível detectar profundas dificuldades na compreensão de conteúdos de Biologia Celular, tanto por estudantes com visão típica quanto por estudantes portadores de deficiência visual. Dentre as mais marcantes está a dificuldade de visualizar e compreender organelas e outros constituintes celulares, já que tais estruturas são frequentemente representadas e simplificadas como figuras bidimensionais em diferentes materiais didáticos. Este cenário é frequentemente produto da forma como tais conteúdos são abordados e da escassez de metodologias e ferramentas de ensino adequadas aos diferentes

perfis de estudantes (MICHELOTTI; LORETO, 2019; SILVA, ALESSANDRA DIAS COSTA; JÚNIOR; GOBARA, 2019; VERASZTO; VICENTE, 2022).

3.2.2. Proposta de Solução

Diante de tal problemática, propusemos o desenvolvimento de ferramentas de ensino baseadas em multissensorialidade, RV e RA, com intuito de sobrepujar as dificuldades de ensino e aprendizagem sobre o tema. A partir de recursos populares junto aos estudantes, e com diversas possibilidades de aplicação, estaríamos auxiliando na compreensão das estruturas estudadas em Biologia Celular, trazendo-as para uma escala de fácil visualização e que replicaria sua aparência 3D de forma mais próxima da real. Além disso, estaríamos mitigando a escassez de ferramentas de ensino e aprendizagem para estudantes com deficiência visual, ao mesmo tempo que ofereceríamos novas possibilidades metodológicas para o ensino inclusivo de Biologia Celular.

3.2.3. Planejamento

O planejamento das atividades desse projeto envolveu o desenvolvimento do referencial teórico que norteou a organização dos passos a serem seguidos para solucionar o problema. Mediante revisão de literatura pertinente, como artigos científicos e livros de referência, selecionamos os tópicos de Biologia Celular que seriam abordados neste projeto. As principais estruturas constituintes de uma célula eucariótica animal foram selecionadas. Esta seleção se deve, principalmente, ao fato da apresentação/reapresentação da célula, suas estruturas e respectivas funções constituir ponto de partida de disciplinas como Biologia Celular e Histologia em cursos de graduação das áreas da saúde e biológicas. Nesses cursos, tais conteúdos representam o ciclo básico de aprendizagem e requisito fundamental para os estudantes, uma vez que contribuem para o entendimento de temáticas mais complexas, como tecidos e sistemas orgânicos. Além disso, são importantes para a formação profissional dos graduandos e para realização de pesquisas na área (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Devido à esta importância, tais conteúdos foram considerados os alvos ideais para construção das ferramentas didáticas aqui propostas, como detalhado no Quadro 1.

Quadro 1 - Objetos de estudo e subtemas de Biologia Celular incluídos no escopo deste projeto

OBJETO DE ESTUDO	DETALHAMENTO
Célula	• Descrição das características básicas e das principais diferenças estruturais encontradas em células procarióticas e eucarióticas. • Definição das principais características de células eucarióticas animais.
Membrana Plasmática	• Descrição das características básicas da membrana plasmática, suas funções, composição química, aspectos que interferem em sua fluidez, mecanismos de transporte e especializações.
Citoplasma	• Descrição das características básicas do citoplasma, suas funções, constituição do hialoplasma e caracterização dos depósitos citoplasmáticos.
Citoesqueleto	• Descrição das características básicas do citoesqueleto, suas funções e caracterização dos microtúbulos, dos filamentos intermediários e dos filamentos de actina.
Núcleo Celular	• Descrição das características básicas do núcleo interfásico e em divisão, do envelope nuclear, do nucléolo e da cromatina e suas respectivas funções.
Centríolo e Centrossomo	• Descrição das características básicas dos centríolos, suas funções e participação na organização dos centrossomos.
Mitocôndria	• Descrição das características básicas das mitocôndrias, suas funções e origem.
Ribossomo	• Descrição das características básicas dos ribossomos, suas funções e participação na síntese proteica.
Retículo Endoplasmático	• Descrição das características básicas do retículo endoplasmático, suas funções e caracterização e diferenças do retículo endoplasmático liso e do retículo endoplasmático rugoso.
Complexo de Golgi	• Descrição das características básicas do complexo de Golgi, suas funções e participação nas vias de secreção.
Lisossomo	• Descrição das características básicas dos lisossomos, suas funções e participação na autofagia.
Endossomo	• Descrição das características básicas dos endossomos e suas funções.
Peroxissomo	• Descrição das características básicas dos peroxissomos e suas funções.
Proteassomo	• Descrição das características básicas dos proteassomos e suas funções.

Fonte: Autor (2025).

É sabido que a metodologia utilizada em sala de aula para abordar um conteúdo específico deve atender aos objetivos de ensino e aprendizagem, como intuito de garantir que o método escolhido será realmente apropriado (AL-RAWI, 2013). Partimos, portanto, para a seleção dos recursos necessários para o desenvolvimento das ferramentas de aprendizagem baseadas em multissensorialidade, RV e RA elencadas como parte da solução do problema. Esta etapa demandou estudo teórico e aquisição de conhecimento técnico, requisitos fundamentais para estruturação de um projeto de pesquisa comprometido com a investigação de soluções de problemas inerentes à educação.

O desenvolvimento de um site da internet também foi elencado como importante recurso, pois funcionaria como um espaço virtual (hub) que concentraria as ferramentas de ensino-aprendizagem desenvolvidas, além de facilitar o acesso às mesmas. Ademais, a rede

mundial de computadores possibilita que professores e estudantes encontrem fontes de informações confiáveis, pensem de forma crítica e criativa e se tornem colaborativos sem limitações de tempo e espaço (DOGRUER; EYYAM; MENEVIS, 2011).

Finalizada a etapa de pesquisa preliminar e planejamento, seguimos para a etapa de prototipagem.

3.2.4. Criação das ferramentas de ensino-aprendizagem

A construção dos materiais didáticos selecionados demandou estudo teórico e prático, para averiguar quais alternativas à problemática eram tangíveis e para adquirir conhecimento técnico, tendo em vista que o design das ferramentas demandou utilização de softwares e equipamentos específicos.

3.2.5. Parcerias estabelecidas

Durante o desenvolvimento deste projeto, contamos com a colaboração do seguintes grupos e organizações:

- Professores convidados de Biologia Celular da Universidade Federal de Minas Gerais forneceram preciosas recomendações para aperfeiçoamento das ferramentas de ensino-aprendizagem durante a etapa de validação.
- O Núcleo de Acessibilidade e Inclusão (NAI) é referência no atendimento de alunos dos níveis fundamental, médio e técnico, de alunos de graduação e pós-graduação e de servidores da UFMG com necessidades educacionais especiais e com deficiência física, sensorial ou intelectual. O NAI oferece serviços de proposição, organização, coordenação e execução de ações para assegurar a inclusão dessas pessoas à vida acadêmica e profissional (NAI, 2022). Tendo em vista que este projeto objetivou desenvolver ferramentas de ensino-aprendizagem tanto para alunos com visão típica quanto para alunos com deficiência visual, foi necessário garantir que estas ferramentas fossem o mais acessíveis possível. Devido à experiência do NAI em atender membros da comunidade acadêmica, foi estabelecida parceria no sentido de obtermos aconselhamento profissional quanto aos aspectos de inclusão que deveriam ser

implementados no site. Além disso, o NAI auxiliou na captação de voluntários com diferentes níveis de deficiência visual para colaboração na aplicação dos produtos propostos no presente projeto.

- O Núcleo de Educação e Comunicação em Ciências da Vida (NEDUCOM) possui vasto acervo de modelos 3D construídos em resina e gesso que representam estruturas celulares (NEDUCOM, 2023). Além disso, acolhe a exposição “A Célula ao Alcance da Mão”, uma proposta que facilita o estudo da estrutura e do funcionamento da célula por indivíduos com visão típica e com deficiência visual, e que é acompanhada de livros tipográficos e em braile (RIBEIRO, 2004, 2005). Vários desses modelos do NEDUCOM foram gentilmente disponibilizados para aplicação juntamente com outras ferramentas físicas e multissensoriais.

4. ARTIGOS RESULTANTES

4. ARTIGOS RESULTANTES

Enquanto uma pesquisa-ação, este projeto procurou tanto levantar soluções para problemáticas relacionadas ao objeto de estudo quanto ampliar os limites do conhecimento na área. O desenvolvimento de ferramentas de ensino-aprendizagem baseadas em multissensorialidade, RV e RA, propôs, justamente, sobrepujar tanto as dificuldades de aprendizagem de alunos com visão típica quanto de alunos com deficiência visual, de forma a oferecer recursos que permitam um ensino de fato inclusivo, onde todos os alunos possam trabalhar usando recursos similares.

As etapas de desenvolvimento de tais ferramentas constituíram objetos de extensa pesquisa, uma vez que demandaram preparação, execução e testagem. Esses processos geraram interpretações, discussões e o aperfeiçoamento das técnicas de construção das próprias ferramentas, cujos resultados são aqui descritos.

De modo a superar obstáculos científicos, foram necessários vários ciclos de pesquisa teórica e prática durante a prototipagem. Com intuito de detalhar a criação das ferramentas e facilitar a compreensão das etapas seguidas, assim como suas metodologias e resultados específicos, foram compilados três artigos científicos que resultaram diretamente do projeto desenvolvido, a saber:

1. Teaching Cell Biology to a visually impaired student: promoting inclusion and teacher training in higher education

- Artigo aceito para publicação no periódico *International Journal of Inclusive Education* (Fator de Impacto 1.8, 2023), em 30 de abril de 2025.

2. Development, application and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes

- Artigo publicado em acesso antecipado (early view) no periódico *Anatomical Sciences Education* (Fator de Impacto 5.2, 2023) em 26 de março de 2025. Incluído definitivamente no volume 18, número 5, páginas 462–484, em maio de 2025. Nesta

última ocasião, uma das ilustrações desenvolvidas para o artigo foi selecionada como imagem de capa do volume. DOI: 10.1002/ase.70024.

3. Desenvolvimento e validação de site inclusivo de ensino de Biologia Celular baseado em realidade virtual e realidade aumentada

- Manuscrito a ser submetido para publicação.

Artigo 1: Teaching Cell Biology to a student who is blind: promoting inclusion and teacher training in higher education



International Journal of Inclusive Education

Teaching Cell Biology to a visually impaired student: promoting inclusion and teacher training in higher education

Submission ID	241358190
Article Type	Original Article
Keywords	cell biology, learning, teaching, visual impairment, inclusion
Authors	Júlio Panzera Gonçalves, Thalita Marcolan Valverde, Tânia Mara Segatelli, Cleida Oliveira

For any queries please contact:

TIED-peerreview@journals.tandf.co.uk

Note for Reviewers:

To submit your review please visit <https://mc.manuscriptcentral.com/TIED>

**Teaching Cell Biology to a visually impaired student: promoting
inclusion and teacher training in higher education**

Júlio Panzera Gonçalves^a, Thalita Marcolan Valverde^a, Tânia Mara
Segatelli^a, Cleida Aparecida de Oliveira^{a*}

^a*Department of Morphology of the Biological Sciences Institute, Federal University of
Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.*

*cleida@ufmg.br

Teaching Cell Biology to a visually impaired student: promoting inclusion and teacher training in higher education

Visually impaired students face several barriers in higher education, including methodological approaches that do not favour their learning processes. Difficulties are critical in Cell Biology and visually impaired students often rely on other senses to learn. In this sense, multisensory approaches may be more effective than those traditionally used for teaching this discipline in undergraduate courses. This study aimed to describe the experience of a teaching intern in the development and application of Cell Biology inclusive learning methodologies presented to a blind student enrolled in a healthcare undergraduate course, and the challenges both experienced. Aiming to reduce the student's learning gaps, the intern used palpation of three-dimensional models representing organelles and cell structures, printed representations with braille support and hand-made schematic drawings with embossed contours accompanied by oral explanations. Efficiency of these procedures was evidenced by the improvement of the blind student's learning skills, increase of participation in class activities and positive development of communication skills. These observations demonstrate the importance of adapting and creating teaching strategies that encourage the establishment of educational spaces enriched with integration, inclusion, and diversity principles, not only for visually impaired students, but also for students with other disabilities.

Keywords: cell biology; learning; teaching; visual impairment; inclusion

Sustainable Development Goals:

SDG 4: Quality education;

SDG 10: Reduced inequalities

Introduction

Universality of education refers to the principle that access to educational opportunities should be guaranteed to anyone, regardless of their ethnic, social, economic, cultural origin or any other personal characteristics (UN, 1948). Such paradigm is the essential

objective of so-called inclusion policies, which seeks to eliminate barriers that prevent people with disabilities from receiving adequate instruction (UNESCO, 2015).

Disability refers to conditions that affect the way a person interacts with the environment and limits the ability to perform everyday activities (Altman, 2014; Grue, 2016). Disabilities can be physical, sensory, cognitive and may be temporary or permanent. Sensory disabilities include impairments that affect one or more of the five senses (Kee, 1990).

Visual impairment includes a range of conditions that affect ability to see and interpret visual information. Snellen chart is a well-known visual acuity test that includes reading letters or symbols at a fixed distance (usually 20 feet or 6 meters). Visual acuity is expressed as a fraction, where the numerator represents the testing distance, and the denominator indicates the distance at which a person with normal vision sees the same details (Kniestedt and Stamper, 2003). People with low vision have visual acuity less than 6/18, but equal to or better than 3/60, in the best-corrected eye. Blind people have visual acuity of less than 6/18 in the best-corrected eye (World Health Organisation, 2007).

Visually impaired students face social and structural obstacles when entering higher education institutions worldwide, including discriminatory attitudes by students and teachers, which harm their integration into the group and their learning (Gin et al. 2020; Kauffman et al. 2022). They are usually confronted by architectural barriers, which create physical impediments to their safe mobility (Croft, 2020; Gilson and Dymond, 2012; Pereira et al. 2020), as well as inadequate methodological approaches that do not favour their learning processes (Gin et al. 2020; Love et al. 2015).

The number of disabled students enrolled in Brazilian universities increased significantly from 23.250 to 63.404 between 2011 and 2021. Regarding visually

impaired ones, there were an increase of 3.301 to 3.482 blind students and 5.944 to 20.172 students with low vision in the same period (INEP, 2011; 2021; 2022). This growth is attributed to inclusive policies and legislation like the 'Brazilian Law for the Inclusion of People with Disabilities' (Law No. 13.146), which seeks to ensure equal access to education, and the 'Quota Law' (Law No. 13.409), which establishes the reservation of vacancies in technical and higher education courses at Federal Institutions for people with disabilities (Brasil, 2015; 2016).

This scenario represents an advance, even though the growing enrolment of students with disabilities in universities poses new institutional challenges, since the inclusion process is not fully consolidated (Selau et al. 2017). It is not enough to guarantee the access of these students to higher education, but also to encourage their permanence. To achieve this goal, pedagogical strategies integrating disabled students with their peers and educators, and offering inclusive learning opportunities are pivotal for their educational development.

Cell Biology learning context for normovisual and visually impaired undergraduate students

Cell Biology teachers face challenges in fostering students' ability to apply and synthesise complex information. These skills are essential for the abstraction of basic and advanced biological concepts (Gehring and Eastman, 2008). Students come to universities with varying backgrounds and learning levels, making Cell Biology a demanding subject. Many students are not familiar with real images of cells, relying on drawings and diagrams that hinder comprehension of cell structure and function (Araújo-Jorge et al. 2004). Therefore, Cell Biology is considered a complex discipline, permeated by unfamiliar terms and concepts (Duda and Adpriaydi, 2020). Additionally, the difficulty in visualising cell structures and processes ends up making learning often

frustrating (Salgado and Gautério, 2020). These and other perceptions affect the students' performance and even impact their permanence in graduation courses (Tracy et al. 2022).

Cell Biology study primarily depends on textbooks, slideshows, and microscopes, visual tools that enable students to mentally transform two-dimensional forms into three-dimensional representations, facilitating comprehension of cell structures and functions (Guimarães et al. 2016; Lazarowitz and Naim, 2013). Students' mental models, enriched by a large number of causal, spatial and temporal concepts and abstractions, comprises an important step in the consolidation of knowledge (Reynaga-Peña, 2015). When submitted to approaches that do not allow the creation of mental images of cell structures, visually impaired students may be drastically impacted in their process of cell abstraction, resulting in fragmented or incomplete learning.

Visually impaired students often rely on hearing and touch to learn (Lintangsari and Emaliana, 2020; Pandey, 2020). The multisensory approach, is more efficient than traditional teaching methodologies, as it increases the ability to acquire and assimilate information (Castro et al. 2015). Interestingly, multisensoriality, when applied in the classroom, allows both visually impaired and sighted students to learn by taking advantage of the same learning situations (Fernández et al. 2019).

Cell Biology comprises a favourable field for the application of multisensory learning tools, considering that it deals with abstract themes (Beaulieu and Petit-Turcotte, 2018). Touch allows the extraction of information and assists the creation of mental images without the use of visual resources (Reynaga-Peña, 2015). Therefore, tactile strategies, such as the use of physical three-dimensional models representing organelles and cell structures, comprise an alternative for visually impaired students (Lima et al. 2022). These models favour learning by allowing students to reflect on how

these structures contributes to biomolecular processes (Johannes et al. 2016; Reinke et al. 2021). There is also the possibility of combining approaches that complement each other and work around their limitations. In this sense, providing adapted resources, such as braille bibliography, is important to create stronger learning opportunities (Sant'anna et al. 2016).

Accessibility and inclusion initiatives in the university context

Many initiatives promoting visually impaired inclusion rely on the 2008 National Policy on Special Education for Inclusive Education in Brazil. This policy ensures quality education for all, including those with disabilities and high abilities (Brasil, 2008), aligning with the 'Brazilian Law for the Inclusion of People with Disabilities' and the 'Quota Law'. Brazilian universities are urged to establish committees and working groups to ensure access and support for visually impaired students.

According to these directives, the Federal University of Minas Gerais (UFMG) presents several organisations with inclusive proposals, such as:

- The Accessibility and Inclusion Nucleus (NAI), a reference in the attendance of high school, undergraduate and graduate students and UFMG staff with physical, sensory, or intellectual disabilities and special educational needs. NAI offers proposition, organisation and coordination services to ensure the inclusion in academic and professional life as well as to advise on the development of adapted didactic materials (NAI, 2022).
- The Museum of Morphological Sciences has permanent and itinerant exhibitions with anatomical pieces, sculptures in plaster and resin and photomicrographs of cells and tissues. The Museum is adapted to facilitate the access to its dependencies, and also houses 'The Cell at Hand's Reach' exhibition, a three-

dimensional model collection, accompanied by typographic and braille texts, that facilitates the study of the structure and functioning of the cell and tissues by normovisual and visually impaired individuals (Ribeiro, 2004; Ribeiro, 2005).

- The Education and Communication in Life Sciences Centre (NEDUCOM), which is a thematic laboratory of the Institute of Biological Sciences of UFMG, whose main objective is to disseminate scientific knowledge to the population. NEDUCOM has a vast collection of three-dimensional biological models built in resin and plaster, including replications of ‘The Cell at Hand's Reach’ exhibition, produced by the Museum of Morphological Sciences (NEDUCOM, 2023).

The long-term exclusion scenario in higher education institutions is being gradually changed by the implementation of initiatives which seek to create inclusive educational environments (Paz Maldonado, 2018). Some of these initiatives require the establishment of teacher training programs focused on the formation of professionals truly committed (Calvo, 2015).

Efforts to implement inclusive education also stem from teachers and interns participating in supervised internships (Guimarães and Costa, 2022; Medrado et al. 2022; Muñoz-Martínez, 2021), which enhance teaching skills and provide practical experience (Shupp and Bloomford, 2023). These initiatives also encourage interns to get involved in institutional issues, such as proposing and implementing internal inclusion policies.

Method

Case studies, as a qualitative methodology, seek to describe and investigate phenomena

in specific contexts. For this purpose, it may encompass the investigator's definitions and boundaries of the phenomenon under study, the clarity regarding the investigator's role, the thoroughness in collecting and synthesising evidence and the contextualisation of the findings (Alpi & Evans, 2019). As a case study, this work aimed to describe a successful experience from a supervised internship, fostering reflections to shift education paradigms, enhance teacher training and implement inclusive methodologies.

The Case

The experience reported took place during the Didactic Internship of a Ph.D. student enrolled in the disciplines 'Teaching Training' offered by the Cell Biology Graduate Course at the UFMG/Brazil. During regular meetings of the 'Teaching Training' disciplines, interns and supervisor reflect on their teaching experiences, challenges, ideas, and successful practices. Through extensive discussions and reflections on professional issues, interns are continuously prepared to deal with complex situations and ethical dilemmas that may arise in the classroom, helping them to develop critical awareness and make responsible decisions. Stimulated by this environment of mutual support, interns initially observe their mentor's performance in the classroom and then apply theoretical knowledge in the elaboration and conduction of their own classes for undergraduate students. Under the watchful eye of the mentor, interns learn to connect theory with practice and to adapt their approaches according to the needs of their students (Valverde et al. 2017).

As an intern in the aforementioned supervised internship, the Ph.D. student participated in undergraduate courses, as well as in regular meetings where aspects of higher education teaching were widely discussed. Those discussions, combined with the long experience in basic education and prior knowledge about inclusive learning

theories, contributed even more to the intern's formation. Based on this background, the intern felt prepared to face the challenge to tutor a totally blind undergraduate student.

By participating in undergraduate courses, the intern had the opportunity to get to know, through his mentor, the trajectory of a blind student enrolled in a healthcare undergraduate course, who, for ethical reasons, will be here referred as C. The student was literate in braille and in the use of original state and stylus. Despite being very dear to his classmates, who, in addition to keeping him company, helped him move around the university premises, C demonstrated difficulties understanding the content of Cell Biology during theoretical and practical classes, which were reflecting negatively in his academic performance.

Furthermore, the absence of appropriate methodologies during C's previous scholar trajectory, resulted in long-term gaps in comprehension of Cell Biology basic concepts. Due to these gaps, C demonstrated enormous difficulties in understanding Cell Biology content during both theoretical and practical classes. These difficulties impacted the student's academic performance and culminated in a low score in the first test applied to the class. Faced with this embarrassment, C's self-esteem was impacted, fact that was evidenced by the non-participation in classes. This is not an uncommon reality for visually impaired people in higher education. Crowded classrooms and disciplines with many contents to be taught make difficult for teachers to attend the special needs of each student (Negash and Gasa, 2022).

Cell Biology classes are mainly based on methodologies and strategies focused on visual resources such as textbooks, slideshows, videos and light microscopes. All these resources were unintelligible to C. During theoretical classes, C's learning process was based on listening and trying to memorise the teachers' explanation, or eventually

1
2
3
4 recording the explanation by using a braille typewriter. Due to the large volume of
5
6 information, the contents were memorised or transcribed by C in a fragmented way. In
7
8 practical classes, the problem was even worse since the learning process were based on
9
10 viewing histological slides under light microscope. Obviously, such procedure was
11
12 ineffective for C. This lack of appropriate methodologies caused a profound gap in C's
13
14 learning process during practical classes.
15

16
17 The intern envisaged in C's situation an opportunity to help overcoming learning
18
19 gaps, and also a propitious moment to put into practice the theoretical knowledge
20
21 acquired by him in the 'Teaching Training'. After volunteering to attend C, with the
22
23 agreement and support of the discipline teachers, the first step taken was to listen to the
24
25 student to identify learning gaps. Great difficulty in abstracting basic Cell Biology
26
27 concepts, such as the functioning and morphology of cell organelles was detected, as
28
29 stated by C:
30
31

32
33 Since teachers often use slideshows to explain the components of
34
35 cells, and I can't see, I try to listen carefully to the explanations. Even so, I
36
37 find it difficult to understand the shape of cells and how they work.
38
39
40

41
42 C's statement allowed the intern to elaborate a teaching work plan to meet the student
43
44 needs, which was based on the syllabus for Cell Biology discipline. Different moments
45
46 were set to work with C on fundamental subjects and to review Cell Biology content.
47
48 Tutoring classes were carried out during school semester, concurrently with regular
49
50 classes.
51
52

53
54 Aware of the efficiency of using multisensoriality in the learning of visually
55
56 impaired students, the intern envisaged the possibility of using representative tactile
57
58
59
60

models of cell structures during classes. For this purpose, it was necessary to identify the resources available in the institution to be applied to this specific situation. At that moment, it was important for the intern to understand the value of collaborations for solving complex problems that arise in the routine of higher education teachers.

Necessary support was found especially in the UFMG's NAI and NEDUCOM. NEDUCOM allowed the intern to teach C by using the three-dimensional models built in resin and plaster representing cell organelles. Palpation of three-dimensional models was carefully guided by the intern, who also motivated C to extend the oral explanation and palpation if there were still doubts about the current subject. After the presentation of each new three-dimensional model and after the oral explanation, the intern emphasised the main points discussed, giving C the opportunity to clarify new doubts that may have arisen. The intern noticed, as the classes progressed, that it became easier for the student to quickly enumerate functions of previously touched structures.

Use of NEDUCOM's collection made possible to C to touch the models and sense details of main cell structures. However, Cell Biology study is not limited to the exploration of morphological aspects, since this discipline also includes molecular and genetic concepts involved in complex processes that affect cell functioning (Agrawal, 2022). As such, full consolidation of knowledge of some cell components demanded discussion and elucidation of molecular structures that were not included in NEDUCOM's tactile model collection. The plasma membrane, for example, has a very complex structure and comprises an object of difficult abstraction. To illustrate the membrane basic constitution, low-cost three-dimensional models representing phospholipids were made by the intern by using styrofoam balls and wire (Figure 1).

The nature and the organisation of other structures, such as the cytoskeleton, also comprise complex subjects, mainly due to the diversity of its constituents and

distribution of the filaments inside the cell. Aiming to facilitate the understanding of the cytoskeleton structure and distribution, schematic drawings were hand-drawn by the intern on paper sheets, according to the textbook adopted for the Cell Biology discipline. These drawings had their contours reinforced with the aid of pencil and cork (Figure 2). By applying force on the contours, it was possible to replicate the cytoskeleton structure on the paper sheet's background. This technique proved to be both effective, as it facilitated abstraction through touch, and a simple and low-cost approach to teach Cell Biology complex topics. The development of these low-cost materials was based on the adaptation of techniques previously described (Andrade et al. 2019; Ribeiro et al. 2001; Vaz et al. 2012).

Another cellular process that required intervention to facilitate C's comprehension was cell division. This process is usually difficult to abstract because of the large number of events and cell structures involved. To illustrate these events, schematic drawings representing each stage of cell division were also hand-drawn by the intern. The drawings were converted into printed representations with braille subtitles, which were pressed by the NAI staff (Figure 3).

Bearing in mind that C was literate in braille and previously demonstrated satisfaction in exercising such writing skills, the intern proposed the use of this writing system to create summaries with the main topics of the lessons. C alternated the use of a Perkins Braille Typewriter, stake and stylus to develop the summaries. These exercises provided two additional review moments: the first one, in which the class content was immediately reworked to be transcribed, and a second one, in which C revised the transcribed content whenever it suited him.

During the semester, teachers mentioned the evident evolution in C's learning skills. The student became more confident and even curious about the subjects that

1
2
3
4 would be worked on next, besides being able to clearly answer questions about Cell
5
6 Biology contents. Classmates also manifested evident changes in C's behaviour, mainly
7
8 the increase in participation, optimism, and communication skills. The following
9
10 statement by the student reinforced the manipulation of tactile models' importance
11
12 during regular classes:
13
14
15

16
17 While the teachers were talking about some cell structures, I tried
18
19 to remember if I manipulated them during extra classes. When I touched
20
21 them, I created mind images of those structures. This procedure made the
22
23 understanding much easier for me. When I abstract the shape of an
24
25 organelle or a cell component, it becomes much easier for me to
26
27 understand its function. Before the extra classes, I didn't participate much
28
29 in the regular classes. I was listening, silently, and trying to imagine what
30
31 structure they were talking about. After the extra classes started, with the
32
33 organelles in mind, I was better able to formulate my doubts and to
34
35 communicate them to the teachers.
36
37
38
39

40 The Cell Biology discipline program predicts theoretical and practical tests.
41
42 Consequently, the effectiveness validation of the inclusive activities realised by C
43
44 followed the same method. The tests applied to C were adapted by the intern, by using
45
46 the same inclusive resources adopted for the classes. Since the main learning strategy
47
48 used was palpatory exploration of three-dimensional models, for practical tests,
49
50 different tactile models were given to C, who was asked to identify the cell structures,
51
52 and to point out their respective functions. For theoretical tests, C had to answer questions
53
54 orally formulated. In both theoretical and practical tests, C's answers were transcribed by
55
56
57
58
59
60

the intern *ipsis litteris*, to be analysed by the teacher's team. For each question, C was evaluated according to three parameters: whether the answer given was unsatisfactory (I), satisfactory (II) or more than satisfactory (III). On average, in three different tests, C presented satisfactory results, which, summed, guaranteed approval in the discipline.

Afterward, C issued the following statement, transcribed by the intern:

My knowledge in Cell Biology improved a lot after the extra classes. What contributed the most to this improvement was being able to touch cell structures, which helped me create images in my head. The extra classes were more dynamic and accessible for me, and also made the subject make more sense.

When asked which strategy was most beneficial, C said:

Three-dimensional models were very intuitive for me and the drawings contributed a lot, because they helped me to understand complex processes. Also, braille summaries complemented the classes and helped me to revise on my own.

Discussion

This study described the experience of an intern in the development and application of Cell Biology inclusive learning strategies presented to a blind student enrolled in a healthcare undergraduate course, and the challenges both experienced during the learning process. The intern used three-dimensional models and embossed images of organelles and other cell components to teach the blind student. Guided palpation was used both to review content and to teach new subjects. This procedure combined with

the intern's knowledge of Cell Biology were considered of fundamental importance in the teaching-learning process here described. Additionally, the review of contents and the construction of summaries in braille played an essential role in consolidating C's knowledge.

Different studies have demonstrated the use of assistive technologies to support visually impaired students (Booths, 2022; D'Agostino, 2022; Nees and Berry, 2013; Nicolae et al. 2021; Tekane and Potgieter, 2021). It should be noted that for many higher education institutions, the acquisition of such resources comprehends a financial challenge (Mendonça et al. 2021). Herein, we used pre-existing three-dimensional models and also developed low-cost tools, which allowed the execution of the planned procedures without prejudice to student's learning, even in places with scarce financial resources.

Furthermore, except for the computer-based assistive technologies, which rely on screen-reading software and audio resources, many assistive tools are impractical for totally blind students, such as C. The scarcity of didactic resources for blind students is a serious issue that negatively impacts their access and permanence in higher education institutions. Also, the lack of such resources prevents the creation and the implementation of learning methodologies for this audience, which denotes the importance of new teaching strategies and adaptation of existing ones. For blind students, learning strategies often take advantage of other senses, either through braille or through oral explanation and palpation of models that allude to cell components (Andrade et al. 2019; Dumpel et al. 2023; Jones, et al. 2006; Macedo et al. 2019; Santos et al. 2020). Our study demonstrated that the scarcity of didactic resources can be overcome by implementing strategies that rely on the combined exploration of touch and hearing. We also took advantage of the student's braille literacy to create a more

active learning environment. We used oral explanation supported by the handling of three-dimensional models followed by braille transcription to reinforce the topics addressed. The improvement in student's learning rates, evidenced by positive performance in tests, demonstrates the efficiency of these strategies.

According to Vygotsky (1989), blindness comprises more than the absence of sight and shapes the personality and psyche of individuals in a creative and organic way. Studies have demonstrated that blind individuals show substantial improvements in auditory skills (Kolarik et al. 2020; Nilsson and Schenkman, 2016; Sabourin et al. 2022) and memory (Arcos et al. 2022; Raz et al. 2007). In this work, palpation of three-dimensional representative models of cell structures was always accompanied by oral explanation. We consider that this strategy played a central role and significantly improved the student's academic performance.

Self-esteem plays an important role in learning. Several research indicate that social support provided to these students by staff and their peers can have a positive impact on their academic learning and socio-emotional development (Manitsa and Doikou, 2022). This information demonstrates how important it is to create a support network around these individuals to provide an inclusive environment that will contribute to socialisation, strengthening of self-esteem and, consequently, learning skills. In our study, it was possible to detect that the student's improvement in tests and in class participation had a positive impact on interpersonal relationships, increasing self-esteem and communication skills.

These strategies, although simple, allowed the student to have adapted learning opportunities, which comprised an important experience for both individuals involved. For the assisted student, the classes represented the opportunity to overcome long-term learning gaps. For the intern, the initiative strengthened his teaching skills, making him

to reflect on the need to be prepared to work with students with special needs. In fact, visually impaired students have different abilities, needs and restrictions, however, their intelligence, determination and motivation vary in the same way as that of students without disabilities (Fernández et al. 2019).

Final Considerations

The success of the initiative described here in overcoming learning gaps of a blind student was attributed to the methodologies used in the process and to the intern's support, which contributed to the improvement of the undergraduate student's performance, as well as self-esteem and communication.

The synergistic interaction between professors, supervisors, postgraduate student and internal organisations of the university resulted in the creation of a pioneering pedagogical model, which in addition to promoting in-depth understanding of Cell Biology, encouraged the active engagement of a student with visual impairments in the learning process. This collaboration not only enriched the academic experience of those involved, but also established a valuable precedent for future initiatives in promoting educational excellence at the Federal University of Minas Gerais.

This work stimulated reflections on the importance of adequate teacher training for those who intends to teach not only visually impaired students, but also students with other disabilities. In addition to allowing teachers to understand the specificities of each student and to learn how to offer personalised support, adequate training enables these professionals to adapt the regular curriculum and make it more accessible.

The correct management of an inclusive classroom depends on adequate training. Well-trained teachers may be able to establish effective communication with students with disabilities, to incorporate visual, auditory, and tactile resources into the educational space, and most importantly, to challenge stereotypes and prejudices

1
2
3
4 regarding people with disabilities. These commitments may help to create a more
5
6 inclusive and isonomic educational environment. Awareness of these needs is acquired
7
8 through the exchange of experiences and meticulous assessment of theoretical and
9
10 practical skills of interns by competent supervisors and mentors in favourable
11
12 environments. For these reasons, these practices and training courses should be
13
14 encouraged among undergraduate and graduate students in higher education institutions.
15

16
17 Therefore, this study seeks to encourage teachers and interns to embrace new
18
19 perspectives and methodological approaches, in order to contribute to the literacy and
20
21 emancipation of students with visual impairments and other disabilities.
22

23 24 **Acknowledgments**

25
26 The authors would like to thank C, NAI and NEDUCOM staffs for the contribution.
27

28 29 **Disclosure statement**

30
31 The authors declare that this study was conducted in the absence of any commercial or
32
33 financial relationships that could be interpreted as a potential conflict of interest.
34
35

36 37 **Ethical approval**

38
39 This study was approved by the Research Ethics Committee of the Federal University of
40
41 Minas Gerais (CEP-UFMG) under protocol number CAAE 68680723.7.0000.5149. The
42
43 subject portrayed consented to participate, having voluntarily provided a fingerprint
44
45 signature in a braille-written Informed Consent Form.
46
47

48 49 **Funding**

50
51 This work was supported by CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
52
53 Nível Superior) under Grant 001; and FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do
54
55 Estado de Minas Gerais).
56
57
58
59
60

Notes on contributors

Júlio Panzera Gonçalves, M.Sc., is a Ph.D. student in the Cell Biology Graduate Course at the Federal University of Minas Gerais, MG, Brazil. His research interest is in the development of teaching materials for teaching Cell Biology and morphology.

Thalita Marcolan Valverde, Ph.D., is a volunteer professor at the Department of Cell Morphology at the Federal University of Minas Gerais, MG, Brazil. She also acted as a volunteer in the study of student and teacher evaluations in the Biology Teaching Professional Master's Course (PROFBIO) together with the program's national coordination. Her research interest is in Cell Biology and morphology.

Tânia Mara Segatelli, Ph.D., is a professor at the Department of Morphology at the Federal University of Minas Gerais, MG, Brazil. She develops research, teaching and extension projects in Health Education and Methodologies in Teaching and Learning in Science and Biology. He works as a permanent professor of the Biology Teaching Professional Master's Course (PROFBIO). Her research interest is in Cell Biology and morphology.

Cleida Aparecida de Oliveira, Ph.D., is a full professor at the Department of Morphology, advisor in the Cell Biology Graduate Course at the Federal University of Minas Gerais, MG, Brazil, and coordinator of the Didactic Internship in the same course. Member of the Management Board of the Biology Teaching Professional Master's Course (PROFBIO). Her research interest is in Cell Biology, Morphology and Teacher training.

References

- Agrawal, Swati. 2022. "When molecules come to life – Using Augmented reality for studying protein structure in Cell Biology class." *The FASEB Journal* 36 (S1). <https://doi.org/10.1096/fasebj.2022.36.S1.L7980>.
- Alpi, K. M., and J. J. Evans. 2019. "Distinguishing case study as a research method from case reports as a publication type." *J Med Libr Assoc* 107 (1):1-5. <https://doi.org/10.5195/jmla.2019.615>.
- Altman, B. M. 2014. "Definitions, concepts, and measures of disability." *Ann Epidemiol* 24 (1):2-7. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2013.05.018>.
- Andrade, Léia De, Matheus Henrique Medeiros Grisoski, Pâmmyla Rafaela Ostermann Nunes, Monique Piacentini, Ruth Emilia Nogueira, Rosemy Da Silva Nascimento, Eliane Maria Goldfeder, Juliano Andreoli Miyake, Patricia De Souza Brocardo, and Kieiv Resende Sousa de Moura. 2019. "Projeto democratização do ensino de Ciências Morfológicas: promovendo acessibilidade a pessoas com deficiências visuais." *Extensio: Revista Eletrônica de Extensão* 16 (32):154-166. <https://doi.org/10.5007/1807-0221.2019v16n32p154>.
- Araujo-Jorge, T. C., T. S. Cardona, C. L. Mendes, A. Henriques-Pons, R. M. Meirelles, C. M. Coutinho, L. E. Aguiar, et al. 2004. "Microscopy images as interactive tools in cell modelling and cell biology education." *Cell Biol Educ* 3 (2):99-110. <https://doi.org/10.1187/cbe.03-08-0010>.
- Arcos, K., N. Harhen, R. Loiotile, and M. Bedny. 2022. "Superior verbal but not nonverbal memory in congenital blindness." *Exp Brain Res* 240 (3):897-908. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06304-4>.
- Beaulieu, Elaine, and Caroline Petit-Turcotte. 2018. "Gamification of learning in an introductory cell biology class." *The FASEB Journal* 32 (S1). https://doi.org/10.1096/fasebj.2018.32.1_supplement.535.35.
- Booths, Autumn L. 2022. "Perceptions of High-Tech Assistive Technology Held by Students With Visual Impairments." *Journal of Visual Impairment & Blindness* 116 (4):558-562. <https://doi.org/10.1177/0145482x221120022>.
- Brasil. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência). Lei n. 13.146. Adopted 6 July 2015. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/113146.htm.

- Brasil. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei n. 13.409. Adopted 28 December 2016.
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/113409.htm.
- Brasil. Ministério da Educação. Política nacional de educação especial na perspectiva da educação inclusiva. Adopted January 2008.
<http://portal.mec.gov.br/arquivos/pdf/politicaeducacional.pdf>.
- Calvo, Gloria. 2015. "La formación de docentes para la inclusión educativa. Teacher training for inclusive education." *Páginas de Educación* 6 (1):19-35.
<https://doi.org/10.22235/pe.v6i1.525>.
- Castro, Helena Carla. 2015. "Ensino Inclusivo: Um Breve Olhar Sobre a Educação Inclusiva, a Cegueira, Os Recursos Didáticos E a Área De Biologia." *Revista Praxis* 7 (13). <https://doi.org/10.25119/praxis-7-13-641>.
- Croft, Emma. 2020. "Experiences of Visually Impaired and Blind Students in UK Higher Education: An Exploration of Access and Participation." *Scandinavian Journal of Disability Research* 22 (1):382-392.
<https://doi.org/10.16993/sjdr.721>.
- D'Agostino, Alfred T. 2021. "Accessible Teaching and Learning in the Undergraduate Chemistry Course and Laboratory for Blind and Low-Vision Students." *Journal of Chemical Education* 99 (1):140-147.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00285>.
- Duda, Hilarius Jago, and Adpriyadi. 2020. "Students' Misconception in Concept of Biology Cell." *Anatolian Journal of Education* 5 (1):47-52.
<https://doi.org/10.29333/aje.2020.515a>.
- Dumpel, Renata Guimarães, Andréia Santos Silva, Ricardo dos Santos Pereira, Cristina Delou, and Helena Carla Castro. 2021. "Who said that we do not see? An inclusion strategy for students with visual impairment using cell models and a modeling-clay-based evaluation method." *British Journal of Visual Impairment* 41 (2):363-376. <https://doi.org/10.1177/02646196211036410>.
- Fernández, Gabriela A., Romina A. Ocampo, Andrea R. Costantino, and Néstor S. Dop. 2019. "Application of Didactic Strategies as Multisensory Teaching Tools in Organic Chemistry Practices for Students with Visual Disabilities." *Journal of Chemical Education* 96 (4):691-696.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00816>.

- Gehring, K. M., and D. A. Eastman. 2008. "Information fluency for undergraduate biology majors: applications of inquiry-based learning in a developmental biology course." *CBE Life Sci Educ* 7 (1):54-63. <https://doi.org/10.1187/cbe.07-10-0091>.
- Gilson, C. L., and S. K. Dymond. 2012. "Barriers impacting students with disabilities at a Hong Kong university." *Journal of Postsecondary Education and Disability* 25 (2):103-118.
- Gin, L. E., F. A. Guerrero, K. M. Cooper, and S. E. Brownell. 2020. "Is Active Learning Accessible? Exploring the Process of Providing Accommodations to Students with Disabilities." *CBE Life Sci Educ* 19 (4):es12. <https://doi.org/10.1187/cbe.20-03-0049>.
- Grue, J. 2016. "The social meaning of disability: a reflection on categorisation, stigma and identity." *Sociol Health Illn* 38 (6):957-964. <https://doi.org/10.1111/1467-9566.12417>.
- Guimarães, Elaine Gimenez, Lorena Souza Castro, Keminy Ribett Bautz, and Gustavo Lemos Rocha. 2016. "O Uso De Modelo Didático Como Facilitador Da Aprendizagem Significativa No Ensino De Biologia Celular." *Revista Univap* 22 (40). <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.972>.
- Guimarães, Maria da Cruz Santos, and Elisângela André da Silva Costa. 2022. "O estágio de docência no processo de construção da identidade profissional de pós-graduandos." *Educ. Form.* 7. <https://doi.org/10.25053/redufor.v7i1.4853>.
- INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira). 2022. Censo da Educação Superior 2021 - Divulgação dos resultados. Brasília, DF: Brasil. Ministério da Educação.
- INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira). 2011. Sinopses Estatísticas do Educação Superior - Graduação. Brasília, DF: Brasil. Ministério da Educação.
- INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira). 2021. Sinopses Estatísticas do Educação Superior - Graduação. Brasília, DF: Brasil. Ministério da Educação.
- Johannes, K., J. Powers, L. Couper, M. Silbergliitt, and J. Davenport. 2016. "Tangible models and haptic representations aid learning of molecular biology." *Paper presented at the 38th Annual Meeting of the Cognitive Science Society in Philadelphia, PA.*

- Jones, M. Gail, James Minogue, Tom Oppewal, Michelle P. Cook, and Bethany Broadwell. 2006. "Visualising Without Vision at the Microscale: Students With Visual Impairments Explore Cells With Touch." *Journal of Science Education and Technology* 15 (5-6):345-351. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-9022-6>.
- Kauffman, James M., Dimitris Anastasiou, Marion Felder, Joao Lopes, Betty A. Hallenbeck, Garry Hornby, and Bernd Ahrbeck. 2022. "Trends and Issues Involving Disabilities in Higher Education." *Trends in Higher Education* 2 (1):1-15. <https://doi.org/10.3390/higheredu2010001>.
- Kee, C. C. 1990. "Sensory impairment: factor x in providing nursing care to the older adult." *J Community Health Nurs* 7 (1):45-52. https://doi.org/10.1207/s15327655jchn0701_5.
- Kniestedt, C., and R. L. Stamper. 2003. "Visual acuity and its measurement." *Ophthalmol Clin North Am* 16 (2):155-170, v. [https://doi.org/10.1016/s0896-1549\(03\)00013-0](https://doi.org/10.1016/s0896-1549(03)00013-0).
- Kolarik, A. J., R. Raman, B. C. J. Moore, S. Cirstea, S. Gopalakrishnan, and S. Pardhan. 2020. "The accuracy of auditory spatial judgments in the visually impaired is dependent on sound source distance." *Sci Rep* 10 (1):7169. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64306-8>.
- Lazarowitz, Reuven, and Raphael Naim. 2012. "Learning the Cell Structures with Three-Dimensional Models: Students' Achievement by Methods, Type of School and Questions' Cognitive Level." *Journal of Science Education and Technology* 22 (4):500-508. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9409-5>.
- Lima, P., E. Silva R. Souza, D. G. Guedert, A. C. F. Costa, D. V. Gondim, and M. L. Vale. 2022. "Teaching human anatomy to the visually impaired: A systematic review." *Clin Anat* 35 (5):660-665. <https://doi.org/10.1002/ca.23887>.
- Lintangsari, Alies Poetri, and Ive Emaliana. 2020. "Inclusive education services for the blind: Values, roles, and challenges of university EFL teachers." *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)* 9 (2). <https://doi.org/10.11591/ijere.v9i2.20436>.
- Love, Tyler S., Nicole Kreiser, Elsa Camargo, Michael E. Grubbs, Eujin Julia Kim, Penny L. Burge, and Steven M. Culver. 2014. "STEM Faculty Experiences with Students with Disabilities at a Land Grant Institution." *Journal of Education and Training Studies* 3 (1). <https://doi.org/10.11114/jets.v3i1.573>.

- Macedo, J. P. C, A. V. C. Araújo, W. F. S. Maciel, and J. O. Moura. 2019. "A Eficiência No Uso Do Modelo Tridimensional Da Célula Animal No Ensino De Biologia Celular Para Deficientes Visuais." *Formação de Professores e a Condição do Trabalho Docente* 2:249-258.
<https://doi.org/10.22533/at.ed.41219050726>.
- Manitsa, Ifigeneia, and Maro Doikou. 2020. "Social support for students with visual impairments in educational institutions: An integrative literature review." *British Journal of Visual Impairment* 40 (1):29-47.
<https://doi.org/10.1177/0264619620941885>.
- Medrado, Betânia Passos, Dilma Mello, and Juliana Reichert Assunção Tonelli. 2019. "Inclusive practices and policies in language teacher education courses." *DELTA: Documentação de Estudos em Lingüística Teórica e Aplicada* 35 (3).
<https://doi.org/10.1590/1678-460x2019350307>.
- Mendonca, C. R., K. T. O. Souza, J. T. Arruda, M. Noll, and N. N. Guimaraes. 2021. "Human Anatomy: Teaching-Learning Experience of a Support Teacher and a Student with Low Vision and Blindness." *Anat Sci Educ* 14 (5):682-692.
<https://doi.org/10.1002/ase.2058>.
- Muñoz-Martínez, Yolanda, Francisco Gárate-Vergara, and Cecilia Marambio-Carrasco. 2021. "Training and Support for Inclusive Practices: Transformation from Cooperation in Teaching and Learning." *Sustainability* 13 (5).
<https://doi.org/10.3390/su13052583>.
- NAI. 2022. "NAI - Núcleo de Acessibilidade e Inclusão da UFMG". Accessed October 16, 2023. <https://www.ufmg.br/nai/>.
- NEDUCOM. 2023. "NEDUCOM - Núcleo de Educação e Comunicação em Ciências da Vida". Accessed October 16, 2023. <https://sites.icb.ufmg.br/neducom/>.
- Nees, Michael A., and Lauren F. Berry. 2013. "Audio assistive technology and accommodations for students with visual impairments: Potentials and problems for delivering curricula and educational assessments." *Performance Enhancement & Health* 2 (3):101-109.
<https://doi.org/10.1016/j.peh.2013.08.016>.
- Negash, Kahsay Hailu, and Velisiwe Gasa. 2022. "Academic Barriers That Prevent the Inclusion of Learners With Visual Impairment in Ethiopian Mainstream Schools." *SAGE Open* 12 (2). <https://doi.org/10.1177/21582440221089934>.

- Nicolae, Maximilian, Radu Nicolae Pietraru, Andrei Cristian Barbu, and Andrei Tivgă. 2021. "A Case Study on Migrating the Lab Activities Online – Students' Professors' Perspectives." *eLearning and Software for Education Conference*:341-348. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-21-111>.
- Nilsson, M. E., and B. N. Schenkman. 2016. "Blind people are more sensitive than sighted people to binaural sound-location cues, particularly inter-aural level differences." *Hear Res* 332:223-232. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.09.012>.
- Pandey, R. K. 2018. "Comparative Study of Adjustment of Visually Impaired Students." *Universal Journal of Educational Research* 6 (11):2562-2571. <https://doi.org/10.13189/ujer.2018.061121>.
- Paz Maldonado, Eddy Javier. 2018. "La formación del profesorado universitario para la atención a la diversidad en la educación superior." *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH* 9 (16):67-82. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v9i16.108.
- Pereira, Rosamaria Reo, Rosana Assef Faciola, Fernando Augusto Ramos Pontes, Maély Ferreira Holanda Ramos, and Simone Souza da Costa Silva. 2020. "Alunos com Deficiência na Universidade Federal do Pará: Dificuldades e Sugestões de Melhoramento." *Revista Brasileira de Educação Especial* 26 (3):387-402. <https://doi.org/10.1590/1980-54702020v26e0087>.
- Raz, N., E. Striem, G. Pundak, T. Orlov, and E. Zohary. 2007. "Superior serial memory in the blind: a case of cognitive compensatory adjustment." *Curr Biol* 17 (13):1129-1133. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.05.060>.
- Reinke, N. B., M. Kynn, and A. L. Parkinson. 2021. "Immersive 3D Experience of Osmosis Improves Learning Outcomes of First-Year Cell Biology Students." *CBE Life Sci Educ* 20 (1):ar1. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0254>.
- Reynaga-Peña, Cristina G. 2015. "A Microscopic World at the Touch: Learning Biology with Novel 2.5D and 3D Tactile Models." *Journal of Blindness Innovation and Research* 5 (1). <https://doi.org/10.5241/5-54>.
- Ribeiro, M. G. 2004. "Inclusão Sócio-Educacional no Ensino de Ciências integra Alunos e coloca a Célula ao Alcance da Mão." *Reconhecer Diferenças, Construir Resultados* 1:297-305.

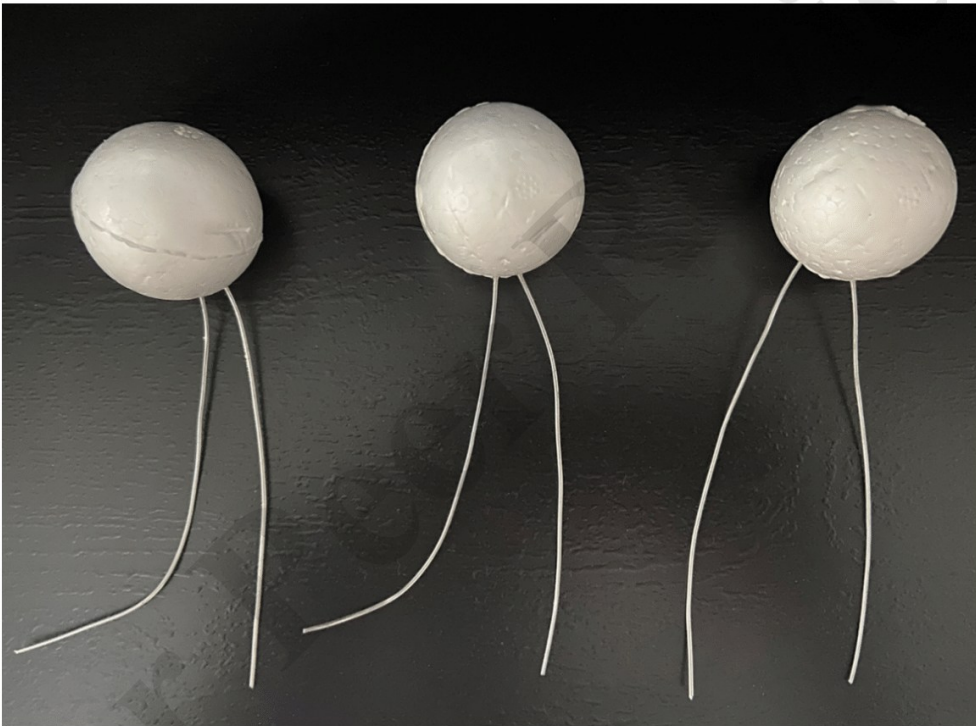
- Ribeiro, M. G. 2005. "Museu de Ciências Morfológicas: um lugar diferente na Universidade Federal de Minas Gerais." *História, Ciências, Saúde-Manguinhos* 12 (suppl):339-340. <https://doi.org/10.1590/s0104-59702005000400017>.
- Sabourin, C. J., Y. Merrikhi, and S. G. Lomber. 2022. "Do blind people hear better?" *Trends Cogn Sci* 26 (11):999-1012. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.08.016>.
- Salgado, Mariana Teixeira Santos Figueiredo, and Vanda Leci Bueno Gautério. 2020. "A tecnologia digital potencializando o ensino de biologia celular: a utilização do blog aliado ao canva." *Revista Tecnologia e Sociedade* 16 (42). <https://doi.org/10.3895/rts.v16n42.10982>.
- Sant'anna, N. F., T. N. Araujo, V. C. S. Lopes, and C. M. C. Delou. 2016. "Microscopia óptica e eletrônica para deficientes visuais." *Revista Benjamin Constant. Edição Especial* (71-86).
- Santos, Ruan Pablo Vieira, Francisco Prado Reis, Joana Angélica Melo de Andrade, and Vera Lúcia Corrêa Feitosa. 2020. "Cell biology for visually impaired people: a study on inclusion methodologies." *Research, Society and Development* 9 (11). <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10010>.
- Selau, Bento, Magda Floriana Damiani, and Fabiane Adela Tonetto Costas. 2017. "Estudantes cegos na educação superior: o que fazer com os possíveis obstáculos?" *Acta Scientiarum. Education* 39 (4). <https://doi.org/10.4025/actascieduc.v39i4.28915>.
- Shupp, Matthew R., and Christopher Bloomford. 2023. "The Graduate Internship: Opportunities to Prepare for Professional Practice." *About Campus: Enriching the Student Learning Experience* 27 (6):16-21. <https://doi.org/10.1177/10864822231151881>.
- Tekane, Rethabile, and Marietjie Potgieter. 2021. "Insights from training a blind student in biological sciences." *South African Journal of Science* 117 (5/6). <https://doi.org/10.17159/sajs.2021/8607>.
- Tracy, C. B., E. P. Driessen, A. E. Beatty, T. Lamb, J. E. Pruett, J. D. Botello, C. Brittain, et al. 2022. "Why Students Struggle in Undergraduate Biology: Sources and Solutions." *CBE Life Sci Educ* 21 (3):ar48. <https://doi.org/10.1187/cbe.21-09-0289>.
- UN (United Nation). 1948. Universal Declaration of Human Rights. (217 [III] A). Paris.
- Unesco. 2015. "The Right to education for persons with disabilities: overview of the measures supporting the right to education for persons with disabilities reported

- on by Member States; monitoring of the implementation of the Convention and Recommendation against Discrimination in Education (8th consultation)." Paris.
- Valverde, Thalita Marcolan, Albená Nunes da Silva, Denise Alves Perez, Gabriel Henrique Campolina-Silva, Zulmira Medeiros, and Cleida Aparecida Oliveira. 2017. "Enfrentando desafios da formação docente na pós-graduação: descrição de uma experiência." *Formação Docente – Revista Brasileira de Pesquisa sobre Formação de Professores* 9 (17):67-84.
<https://doi.org/10.31639/rbfp.v9i17.152>.
- Vaz, J. M. C., A. L. S. Paulino, F. V. M. Bazon, K. B. Kiill, T. C. Orlando, M. X. Reis, and C. Mello. 2012. "Material Didático para Ensino de Biologia: Possibilidades de Inclusão." *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* 12 (3):81-104.
- Vygotsky, L. S. 1989. *Fundamentos de defectología (Obras Completas, tomo 5)*. La Habana: Pueblo y Educación.
- World Health Organisation. 2007. "Global Initiative for the Elimination of Avoidable Blindness: action plan 2006-2011." World Health Organisation.
<https://iris.who.int/handle/10665/43754>.

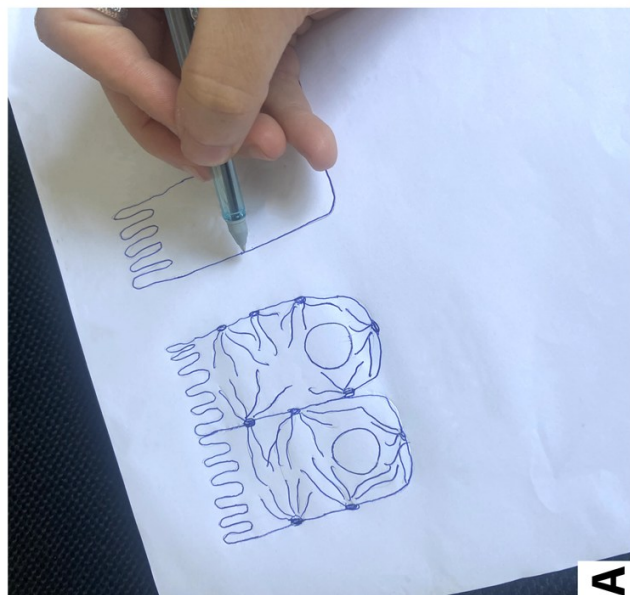
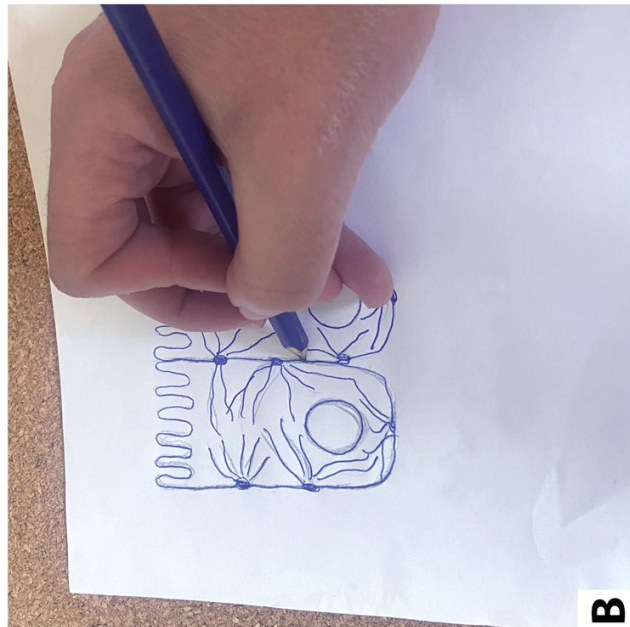
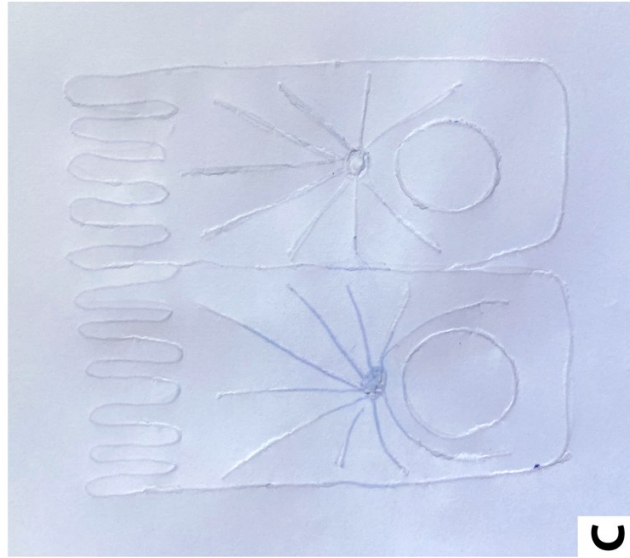
Figure 1. Low-cost three-dimensional models representing phospholipids made with styrofoam balls and wire.

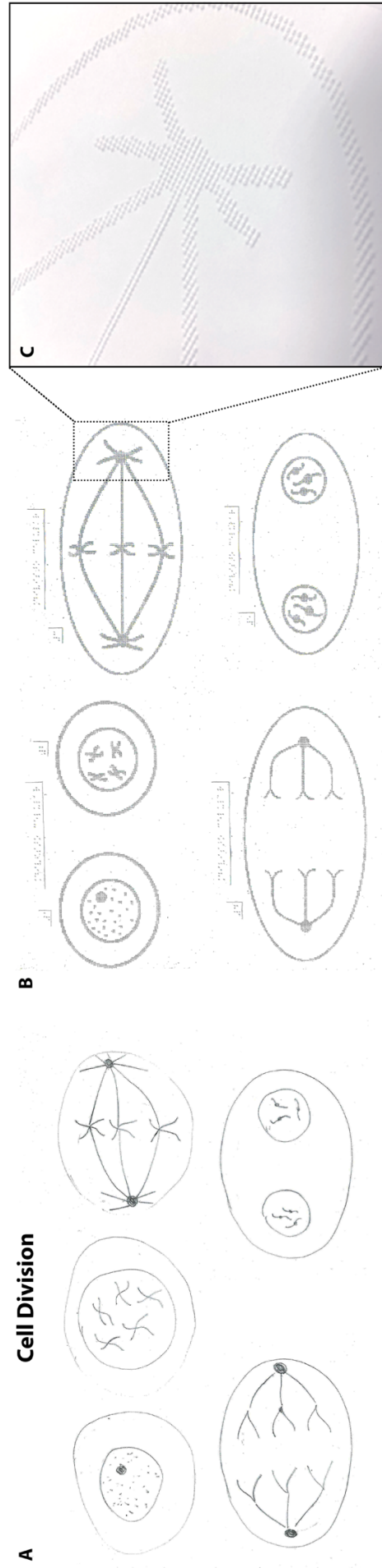
Figure 2. Schematic drawings representing the distribution of cytoskeletal filaments in the cytoplasm. Drawings were handmade on paper sheets (A). The contours were reinforced with the aid of a pencil. Placing the paper sheet above cork prevented it from tearing (B). After reinforcing the contours, it is possible to feel the embossed contours on paper sheet's background (C).

Figure 3. Schematic drawings made on paper sheet representing each stage of cell division (A) were converted into printed representations with braille subtitles (B). Detail of the converted drawing into braille (C).



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

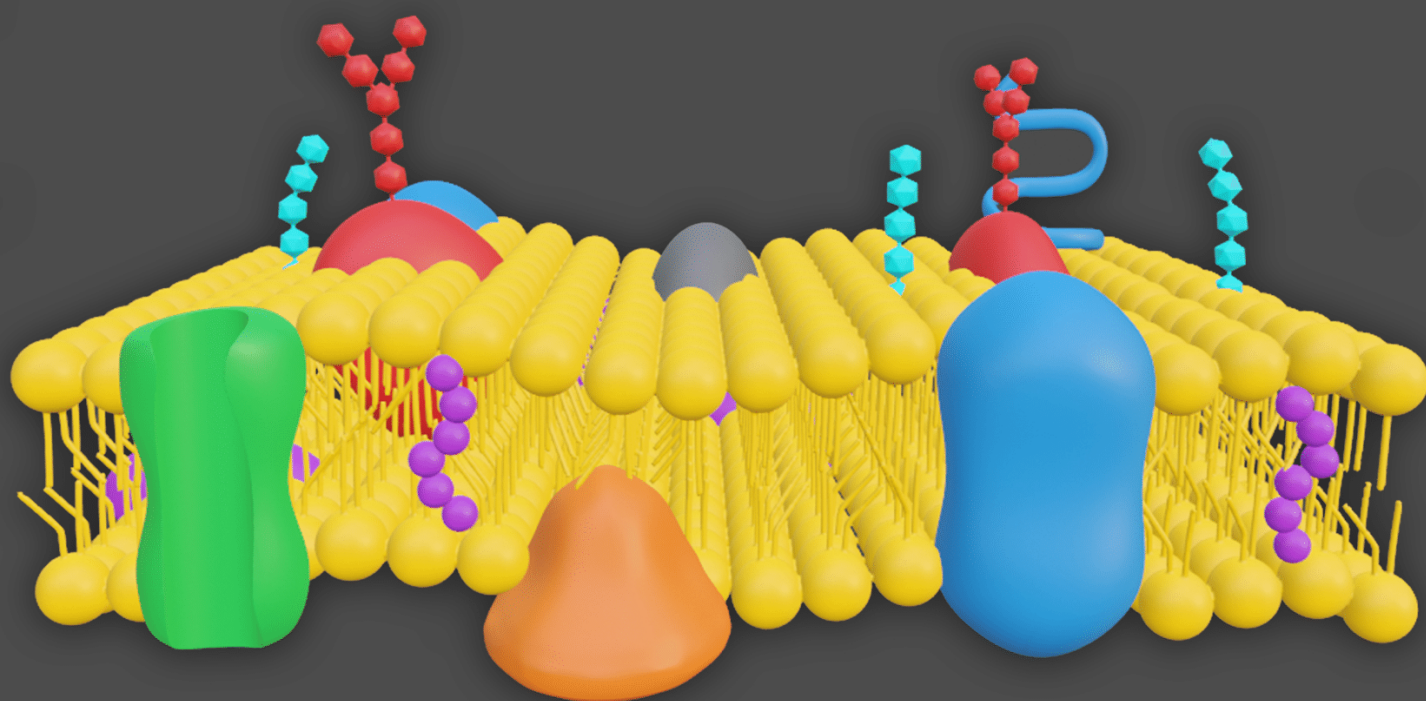




Artigo 2: Development, application and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes

ASE Anatomical Sciences Education

Vol 18, #5, May 2025



WILEY

Jason M. Organ
Editor-in-Chief

AMERICAN
ASSOCIATION FOR
ANATOMY

ASE Anatomical Sciences Education

www.asejournal.com

EDITOR-IN-CHIEF

Jason M. Organ
Indiana University School of Medicine
Indianapolis, IN, USA
jorgan@iu.edu

MANAGING EDITOR

Kimberly McKay
ase@anatomy.org

SPECIAL ISSUE EDITOR

Jonathan J. Wisco
Boston University
Boston, MA, USA
jjwisco@bu.edu

ASSOCIATE EDITORS

Jessica N. Byram
Indiana University
Indianapolis, IN, USA
jbyram@iu.edu

Melissa A. Carroll
George Washington University
Washington, DC, USA
macarroll@gwu.edu

Jon Cornwall
University of Otago
Dunedin, New Zealand
jon.cornwall@otago.ac.nz

Gabrielle M. Finn
University of Manchester
Manchester, UK
gabrielle.finn@manchester.ac.uk

Niels Hammer
Medical University of Graz
Graz, Austria
niels.hammer@medunigraz.at

Sabine Hildebrandt
Harvard Medical School
Boston, MA, USA
Sabine.Hildebrandt@childrens.harvard.edu

Claudia Krebs
University of British
Columbia, Canada
claudia.krebs@ubc.ca

Adam B. Wilson
Rush University
Chicago, IL, USA
adam_wilson@rush.edu

SOCIAL MEDIA EDITOR

Andrew S. Cale
ascale@iu.edu

BOARD OF REVIEWERS

Joy Y. Balta
Point Loma Nazarene University
San Diego, CA, USA

William S. Brooks
University of Alabama at Birmingham
Birmingham, AL, USA

Christina Byun
School of Biomedical Sciences
UNSW Sydney, Australia

Nicole Campbell
Western University
London, ON, Canada

Thomas Champney
University of Miami
Miami, FL, USA

Sarah B. Channon
Royal Veterinary College
United Kingdom

Bipasha Choudhury
University of Manchester
Manchester, UK

Rocky Chun Chung Cheung
King's College London
London, UK

Beom Sun Chung
Yonsei University
Wonju, South Korea

Jon Cornwall
University of Otago
Dunedin, New Zealand

Andrew S. Deane
Indiana University
Indianapolis, IN, USA

Alison F. Doubleday
University of Illinois, Chicago
Chicago, IL, USA

Angelique N. Dueñas
Northwestern University
Chicago, IL, USA

Joyce El-Haddad
University of New South Wales
Sydney, NSW, Australia

Rodrigo Elizondo-Omaña
Universidad Autonoma de NuevoLeon
Monterrey, Mexico

Bertha Escobar-Poni
Loma Linda University
Loma Linda, CA, USA

Sanjib K. Ghosh
All India Institute of Medical Sciences
Patna, India

Arthur Lau Chin Haeng
National University of Singapore
Singapore

Derek Harmon
Ohio State University
Columbus, OH, USA

Michael Hortsch
University of Michigan
Ann Arbor, MI, USA

Nady Hoyek
Université de Lyon, Université Claude
Bernard, Lyon 1
Lyon, France

Heather Jamniczky
University of Calgary
Calgary, AB, Canada

Trahern W. Jones
University of Utah
Salt Lake City, UT, USA

Iain D. Keenan
Newcastle University
Newcastle upon Tyne, UK

Mohammed K. Khalil
University of South Carolina
Greenville, SC, USA

Beverley Kramer
University of the Witwatersrand
Johannesburg, South Africa

Sanet H. Kotzé
Ross University
Basseterre, St. Kitts and Nevis,
West Indies

Michelle Lazarus
Monash University
Melbourne, VIC, Australia

Veronica Macchi
University of Padova
Padova, Italy

Assaf Marom
Technion Israel Institute of Technology
Haifa, Israel

Amanda J. Meyer
James Cook University, Townsville,
QLD, Australia

Sreenivasulu Reddy Mogali
Nanyang Technological University
Singapore

David A. Morton
University of Utah
Salt Lake City, UT, USA

Jason C. Mussell
Louisiana State University
New Orleans, LA, USA

Madeleine E. Norris
University of California
San Francisco, CA, USA

Andrea Oxley
Federal University of Health Sciences of Porto Alegre
Porto Alegre, Brazil

Elena Patera
Human Anatomy Resource Centre (HARC),
University of Liverpool,
Liverpool, United Kingdom

Nalini Pather
University of New South Wales
Sydney, NSW, Australia

Ellen M. Robertson
Randolph Macon College
Ashland, VA, USA

Solomon Segal
AECC University College
Bournemouth, UK

Georgina C. Stephens
Monash University
Melbourne, VIC, Australia

Adam M. Taylor
Lancaster Medical School
Lancaster, UK

Anna Torres
Medical University of Lublin
Lublin, Poland

Ranganath Vallabhajosyula
Lee Kong Chian School of Medicine
Singapore

Marc A.T.M. Vorstenbosch
Radboud University Medical Centre
Nijmegen, The Netherlands

A. Wayne Vogl
University of British Columbia
Vancouver, BC, Canada

Timothy D. Wilson
Western University
London, ON, Canada

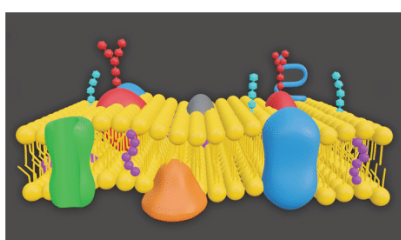
Luqing Zhang
Nanjing University
Nanjing, China

Disclaimer: The Publisher, American Association for Anatomy and Editors cannot be held responsible for any errors in or any consequences arising from the use of information contained in this journal. The views and opinions expressed do not necessarily reflect those of the Publisher, American Association for Anatomy or Editors, neither does the publication of advertisements constitute any endorsement by the Publisher, American Association for Anatomy, Editors, or Authors of the products advertised.

For submission instructions, subscription and all other information visit: <https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/journal/19359780>

Contents

VOLUME 18 | NUMBER 5 | MAY 2025



ON THE COVER:

Cover image: This month's cover image is a model of a plasma membrane from the paper by Gonçalves and Oliveira (this issue), "Development, application, and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes."

Research Report

- | | |
|------------|--|
| 425 | <p>Seven questions for a student's donor: Evaluation of a fictional conversation lends insight into professional identity formation in medical students</p> <p>John Arthur, Waleed Aldadah, Meghan Bernier, Andrew Ko, Jennifer F. Dennis</p> |
| 436 | <p>Evaluating group dynamics through peer assessment during a global student collaboration of interprofessional healthcare education: A longitudinal study across 33 universities</p> <p>Mandeep Gill Sagoo, Pak Yin Lam, Tanvi Sharma, Arisma Arora, Maheen Siddiqui, Adedeji M. Adeniyi, Cecilia Brassett, Geoffroy Noel, Richard Wingate, Sean McWatt, Dana Stearns, Pilar Garcia Souto, Anette Wu</p> |
| 448 | <p>Does viewing pre-lab dissection summary videos correlate with student performance outcomes in medical gross anatomy?</p> <p>Megan E. Kruskie, Rebecca L. Wisner, Jessica N. Byram, Tracy Vargo-Gogola, Andrew S. Deane</p> |
| 462 | <p>Development, application, and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes</p> <p>Júlio Panzera-Gonçalves, Cleida Aparecida Oliveira</p> |
| 485 | <p>Current trends in anatomy course characteristics across US physician assistant programs</p> <p>Colleen M. Cheverko, Chloe Flores, Sabah Hamidi, John Simpson, Hannah Yurich, Adam B. Wilson</p> |

Continues on following page

Review

496

How virtual reality is being adopted in anatomy education in health sciences and allied health: A systematic review
Sharmeen Adnan, Amanda C. Benson, Junhua Xiao

Letter to the Editor

526

Bridging the contextual digital divide in health sciences education: A call for balanced pedagogical strategies
Manuel Millán-Hernández

RESEARCH REPORT



Development, application, and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes

Júlio Panzera-Gonçalves (he/him) | Cleida Aparecida Oliveira

Department of Morphology of the Biological Sciences Institute, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, Brazil

Correspondence

Cleida Aparecida Oliveira, Department of Morphology of the Biological Sciences Institute, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brazil. Email: cleida@icb.ufmg.br

Funding information

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Grant/Award Number: 001; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Grant/Award Number: APQ-05704-23

Abstract

Learning Cell Biology is challenging for both sighted and visually impaired students due to its abstract nature and reliance on bidimensional depictions in textbooks, which often fail to capture the biological complexity of cell structures and functions. To implement inclusive learning environments and address the shortage of learning materials for both sighted and visually impaired students, this work aimed to design, apply, and evaluate learning tools based on digital technologies, using the principles of Educational Design Research. 3D models representing cell membranes were created and embedded in an online virtual reality (VR) environment equipped with audio descriptions and an innovative color-changing interface. Models were also optimized for embedding in an augmented reality (AR) environment on social media. Notably, our work is the first to create such an extensive library of both animate and static VR and AR-based material, covering the structural composition of the membrane, transport mechanisms, and detailed representations of membrane specializations. Additionally, we provided, in an unprecedented way, a systematic description of our results to serve as a roadmap for easy replication and adaptation within the educational community, fostering the creation of new learning tools and approaches. Evaluation of learning tools was conducted with sighted and visually impaired students from biological and health-related undergraduate courses, as well as experienced and early-career Cell Biology teachers. Data revealed positive attitudes toward visual presentation, ease of use, content quality, and effectiveness, underscoring the potential of VR and AR to improve inclusive Cell Biology learning for undergraduate audiences.

KEYWORDS

augmented reality, cell biology, inclusion, learning, undergraduate, virtual reality, visual impairment

INTRODUCTION

Profound challenges in learning Cell Biology content have been reported by both sighted and visually impaired students throughout different stages of their education.¹ This discipline is considered

complex by students due to its abstract nature, which integrates information across molecular, cellular, and genetic levels, among others.^{2,3} Cell structures are often depicted as two-dimensional (2D) figures in different sources, such as textbooks, which are not suitable for adequately expressing their biological complexity.⁴

Furthermore, traditional teaching methodologies are usually based on visual resources, making learning difficult for blind or visually impaired students.⁵

Modern society is facing an era where information is made available at speeds never seen before. Continuous social changes and technological advances keep educational paradigms in a constant state of challenge.⁶ Contemporary students have different requirements and needs,⁷ since, as native digital learners, they no longer adapt to passive learning environments.⁸ When faced with classes mainly based on theoretical approaches encompassing traditional teaching models, their expectations for learning may be lowered.⁹ In this critical scenario, the exploration of new educational resources is mandatory.

The increasing number of students with disabilities enrolled in undergraduate courses, including those with visual impairments, also poses new challenges, mainly because the inclusion process is not completely consolidated across university institutions.¹⁰ Visual disorders or disabilities include—but are not limited to—(i) impairments that may result in the inability to see specific colors (e.g., daltonism and its variants protanopia, deuteranopia, and tritanopia), or all colors (e.g., monochromacy)¹¹; (ii) deficiencies that may compromise visual acuity (e.g., amblyopia,¹² nystagmus,¹³ and strabismus¹⁴); or (iii) disturbances that cause abnormal sensitivity to light (e.g., photophobia, hemeralopia, and nyctalopia).¹⁵ Blind and visually impaired students with those and other conditions often rely on tactile and auditory experiences to learn.^{16,17} Accordingly, a multisensory approach, whose proposal is to combine senses, may be more beneficial to this audience than traditional teaching methodologies, as it increases the ability to acquire and assimilate information.¹⁸

Despite this optimistic scenario, blind and visually impaired students still face learning difficulties due to a multi-leveled scarcity of appropriated methodological approaches¹⁹ and educational resources that meet their needs. If we consider that the general insufficiency of braille textbooks and audio materials or minimal curriculum adaptation already comprises a barrier for the learning of this audience,^{20,21} we can conclude that the specificities of each visual impairment are almost completely neglected.

Given the complexity of the topics covered by Cell Biology, which makes it difficult for both sighted and visually impaired students to consolidate learning, it is necessary to apply new pedagogical strategies.²² In this sense, Digital Information and Communication Technologies (TDICs) have been increasingly applied in the construction of learning tools, as they offer resources and possibilities from popular devices, such as desktop computers, notebooks, smartphones, and tablets.^{23,24} TDICs consist of tools, applications, videos, images, consoles, and virtual games, among others that expand communication possibilities through an internet connection.^{25,26} Previous studies have shown that students often find the use of technology engaging, as it increases their involvement and interaction in the learning process. Research indicates that students not only perceive the didactical use of digital tools as pleasant but also recognize the importance of incorporating mobile technology into daily educational practices.²⁷ By integrating educational

applications and programs, technology encourages students to explore information in new and exciting ways, making classroom instruction more dynamic, interactive, and participatory.²⁸ More interestingly, it has been shown that students prefer to use the same technologies for learning that they already engage with in their personal lives. As simplicity and familiarity are key factors, exploring popular device technologies can make the experience even more pleasant for the students and, consequently, the learning process more systematic and efficient.⁷

Cell Biology effective learning demands that students understand cell morphology and functions. Consequently, the use of three-dimensional (3D) models representing cell components may facilitate the assimilation of their morphological characteristics and the biological processes in which they are involved. 3D modeling has many teaching potentials, as it allows students to visualize and mentally translate the cell and its components from their 2D conformations to their real 3D forms,²⁹ and induces reflection on how cell structures participate in biomolecular processes.⁴ Different studies showed that both virtual reality (VR) and augmented reality (AR) technologies are efficient when associated with teaching and learning processes. While VR allowed students to closely observe the structure and function of virtualized organs, increasing engagement and improving performance,³⁰ AR is reported to support better understanding, concentration, and interaction than the traditional learning methodologies.³¹

Virtual reality (VR) renders an environment that, despite not existing in our physical space, allows users to interact with 3D models.^{32–34} By using input devices (e.g., mouse, keyboard, or touch screen), users can provide commands, which can change the position, shape, or state of these models.³⁵ Such features favor the simulation of realistic situations and the exploration of content at levels that could not be achieved in real scenarios.^{36,37} Furthermore, they create opportunities for students to reflect and raise questions related to their own fields of interest.³⁸ Notably, while a 2019 study successfully demonstrated that VR facilitates the comprehension of enzymatic processes by STEM students,³⁹ a more recent one describes the improvement in the learning of cell structures by engineering students engaged in a VR-based learning experience that featured slideshows and a head-mounted display (HMD).⁴⁰ Those well-succeeded applications highlight VR's potential in making learning more accessible and inclusive, as well as its applicability in different circumstances and educational stages.

VR creates an environment where the user is transported to, whereas in augmented reality (AR), the experiences are added to the physical space.⁴¹ On a device with AR software installed, the user can interact with 3D models superimposed on real scenarios.^{42,43} Accordingly, AR technology consists of an attractive and comprehensive learning alternative,⁴⁴ as it provides students with new opportunities for interaction, in addition to being fun and productive, and having great appeal for younger and technologically engaged audiences. Interestingly, a recent study explored AR technology to create Instagram filters which featured blinking and facial movement feedback to promote the development of cognitive and motor skills

in children with sensory diversity.⁴⁵ Likewise, another research reported the development of Facebook and Instagram filters for the analysis of molecular models by Biomedicine and Pharmacy students.⁴⁶ Both cases highlight the benefits of integrating AR technology with social media to the creation of educational solutions that are adaptable to students' individual needs and demonstrate its unlimited potential for the learning of different students' profiles.

Despite this diversity of technologies and applications, their potential is not yet fully explored in the educational context, as the integration process is impacted by institutional and personnel barriers. From the institutional perspective, both the creation and use of technology-based learning tools are hindered by limited funding and scarcity of good quality equipment or software.⁴⁷ From the personnel standpoint, although some studies demonstrated that teachers expressed a desire to adapt their teaching methods and enhance their competencies to incorporate digital solutions,^{48,49} other studies describe obstacles that make it difficult to develop and integrate digital learning materials effectively into the classroom. These obstacles include time constraints, additional workload,⁵⁰ and lack of technical skills,⁵¹ a competence that is often underdeveloped by several teachers and other education workers, mainly because of inadequate professional development and training.⁵² Such concerns highlight the need for instructional materials that facilitate the development of digital learning resources, providing educators with structured guidance and practical tools to create effective and inclusive content.

Action research is characterized by finding solutions for the object of study and expanding scientific frontiers.⁵³ Like any other action research, the development of learning materials involves the adoption of a clear and replicable methodology,⁵⁴ based on well-established premises, such as those found in "Educational Design Research" (EDR). The EDR systematization involves the completion of some stages well defined by the researcher, including preliminary research, prototyping, and validation. The preliminary research stage involves the development of the conceptual and theoretical workflow for the study, based on context analysis and literature review. Prototyping is the design stage segmented into iterations or research microcycles, each one relying on reflections that aim to improve the tools under development. Finally, validation is the stage that seeks to determine whether the designed tools meet predetermined specifications. This phase may result in recommendations for improving the learning tools, making it necessary to repeat iterations in order to implement new recommendations. Learning materials are successively modified in redesign cycles to ensure its effectiveness.^{55,56}

Considering the promising potential of TDICs and the scarcity of inclusive educational resources, the present study aimed to develop tools based on TDICs and EDR to create equal opportunities for learning cell membranes composition and functioning for sighted students and those with different levels of visual impairment. The plasma membrane and endomembrane were chosen because they are considered difficult topics in Cell Biology. Understanding them requires integrating their morphology and chemical composition, as

well as the dynamics between their components to ensure the fluidity necessary for transporting substances between different cell compartments.⁵⁷ If we take into account that technical guidance and training have been shown to enhance teachers' competence in developing technological learning materials,⁵⁸ this study also aims to serve as a comprehensive instructional manual that facilitates the reproducibility of techniques for creating learning tools based on VR and AR.

METHODOLOGY

In order to implement inclusive learning environments and address the shortage of learning materials for both sighted and visually impaired Cell Biology students, this work aimed to design, apply, and evaluate learning tools based on virtual and augmented realities. The development of learning tools was based on EDR principles, which combine research and (re) designing of educational tools to solve problems associated with teaching and learning. Accordingly, the researcher is responsible for outlining and developing tools and, simultaneously, for reflecting on their characteristics, uses, and repercussions.⁵⁹ To maximize the learning potentials of the tools under development, continuous cycles of design, implementation, analysis, and redesign were necessary.^{55,60} These precepts were observed during the modeling, improvement, and optimization of 3D models, development of VR and AR environments, and implementation of accessibility parameters. Furthermore, the application of the learning tools for target audiences and interpretation of the feedback provided were also carried out to guarantee new enhancement opportunities.

Regarding the evaluation stage of the learning tools, as a quasi-experimental descriptive and qualitative study, this research does not present a random distribution of participants but includes sighted and visually impaired students, as well as Cell Biology teachers. Despite this nonrandom distribution, events were controlled during the study, and observed occurrences were used to develop collections according to planning.⁶¹

Workflow

Although complex, understanding plasma membrane structure is fundamental to abstract concepts of Cell Biology, such as membrane transport and endomembranes. For this reason, we proposed the development of three different types of 3D models for cell membranes. Firstly, static 3D models were developed to elucidate the morphology and components of this structure. Secondly, 3D models featuring short, repeatable animations were proposed to illustrate individual movements of phospholipids (rotation, lateral diffusion, and flip-flop). Finally, a third category of 3D models, enriched with complex animations, was developed to illustrate two key aspects: (i) the simultaneous movement of molecules, such as the dynamic motion of phospholipids that guarantee plasma membrane fluidity,

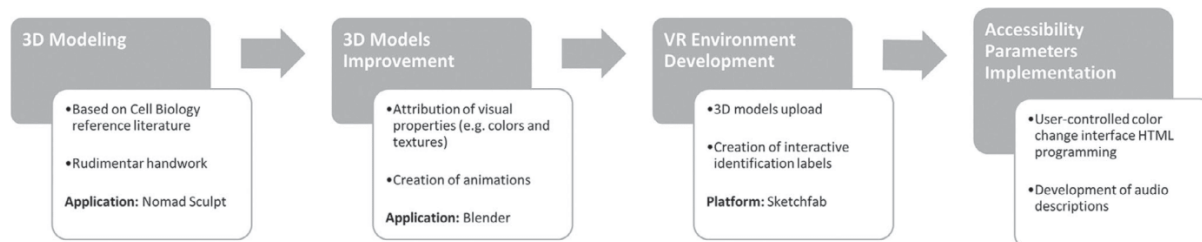
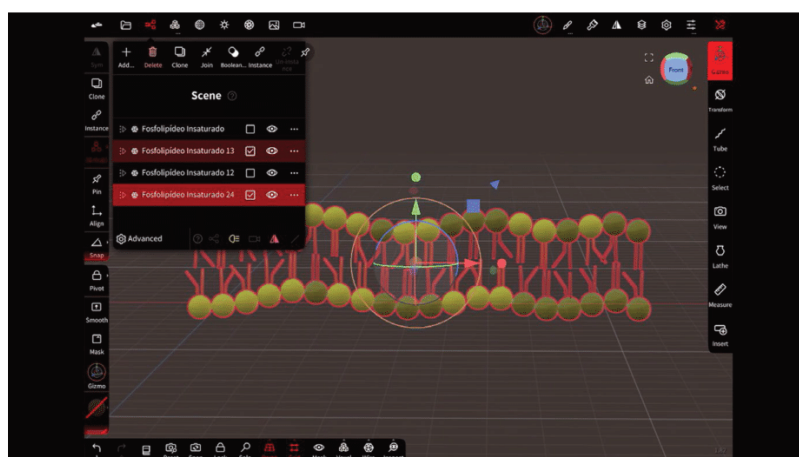


FIGURE 1 Workflow, actions, applications, and platforms necessary for the development of VR-based teaching tools.



VIDEO 1 Time lapse of the modeling process adopted throughout this study (Timestamp: 00:07:220). Video content can be viewed at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.70024>.

and (ii) the intricate cell processes that involve individual and consecutive movements of molecules, such as the flow of electrons and protons in the transport chain, an event that takes place in the inner mitochondrial membrane, which is an example of endomembrane.

Development of 3D models and VR environment

The development of VR-based learning tools was systematized in stages in which specific actions were performed (including 3D modeling, 3D models improvement, VR environment development, and implementation of accessibility parameters), as shown in Figure 1.

To ensure that the design was scientifically accurate, modeling was based on descriptions and illustrative schemes retrieved from Cell Biology textbooks and scientific articles. Furthermore, 3D models were rigorously revised by volunteer undergraduate Cell Biology teachers after modeling. Handwork was performed in Nomad Sculpt,⁶² a mobile application that allows the creation of complex 3D models on portable devices equipped with touch screens, such as tablets and smartphones. The user-friendly interface of this application makes it possible for both beginners and experts to use its tools efficiently, which facilitates modeling. A stylus pencil, an instrument responsive to different intensities of pressure exerted on

touch screens, was used to facilitate modeling, as it provides more precision to commands.⁶³ Video 1 shows a time lapse of the modeling process.

Once the most rudimentary modeling was completed, 3D models were improved in Blender,⁶⁴ a free and open-source 3D creation software. This improvement included the assignment of visual properties to 3D objects, such as color, texture, reflection, transparency, opacity, gloss, roughness, and metallicity. These visual properties are generally referred to as "material" and are used to add realism to 3D models.⁶⁵ Blender was also used to implement the proposed animations.

VR environment development began after modeling and improvement were finished. 3D models were uploaded with a free account to Sketchfab (<https://sketchfab.com/>), a browser-based hosting platform that also offers the possibility of viewing and sharing 3D models.⁶⁶ Relevant structures of each 3D model received interactive labels to allow quick identification. Development progressed with the programming of a web page equipped with accessibility parameters (such as a color-changing interface) where users could interact with the 3D models. This interface was built in the free and open-source Visual Studio Code software⁶⁷ by using Sketchfab's Viewer Application Programming Interface,⁶⁸ a tool that allows the customization of 3D model's colors. HTML, CSS, and JavaScript coding were also used to customize the web page's layout.

In addition to this major accessibility parameter, audio descriptions were developed for each 3D model. An audio description is a technique that provides narration (prerecorded or real-time played by screen reader applications) of images and other media that could not be perceived or understood by people with visual impairments.^{69,70} To create an audio description, it is necessary to carefully analyze the image or visual content to identify important elements and details that should be described. The description must be concise, and redundant information must be avoided.

Optimization of 3D models and incorporation in social media AR environments

To develop the AR-based learning tools, the 3D models were optimized to be compatible with AR applications and platforms. A workflow was established comprising new actions (effects creation, effects testing, effects publication, and effects access facilitation), as shown in Figure 2.

Optimization took place in Meta Spark Toolkit,⁷¹ a Blender add-on capable of making 3D models more lightweight. Optimized 3D models were imported to Meta Spark Studio,⁷² a software that allows the creation of effects within Facebook and Instagram's AR environments. In this tool, effects featuring the optimized 3D models and animations were produced.

Once development was completed, effects were tested in Meta Spark Player,⁷³ an application capable of simulating the effect's functioning before its publication on social media. Finally, effects were published on Facebook and Instagram and received individual URLs (Uniform Resource Locator).

In order to provide access to the effects, their URLs were converted into QR Codes by using the free tool Fast QR Code Maker.⁷⁴ QR Codes are 2D barcodes that can be read by most modern devices equipped with a camera.^{75,76} These codes store information that is translated into links that redirect to specific websites or applications when scanned.^{77,78} From educational perspectives, QR Codes are considered bridges that facilitate access to learning materials. Once displayed on slides or websites, the scanned QR Codes quickly redirect the user to addresses that house educational resources or additional materials.⁷⁹ Additionally, they allow students to follow classroom content on their own devices in real time.

Application, evaluation, and data analysis

Learning tools were applied during Cell Biology classes to sighted students regularly enrolled in two different undergraduate courses in the biological and health areas at the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). After lectures, students received a brief operational training to familiarize them with the tools. Then, they were allowed to access the VR and AR environments by scanning QR Codes or by accessing specific URLs on their notebooks or smartphones. To encourage students' protagonism and investigative skills, all 3D models and audio descriptions were available to be freely explored on their devices.

As an important target audience for the developed tools, students with different visual impairments enrolled in undergraduate courses in the biological and health areas at the UFMG also evaluated the learning tools. Considering that we intended to promote autonomy for all students, the operational training was extended for this group until students achieved a complete understanding of the resources and could operate them independently. In all other aspects, the application was similar to the application for sighted students.

Peer assessment is a crucial step in the development of learning tools. By sharing their impressions and suggestions, which are based on personal and professional experiences, teachers can provide valuable insights that help identify both the strengths and weaknesses of these tools. To foster a collaborative environment and enhance the effectiveness of these resources, Cell Biology teachers who worked in various undergraduate courses in the biological and health areas at the UFMG also contribute to the evaluation of the learning tools.

The Likert scale is often used in qualitative research to measure the levels of agreement of participants with statements proposed in questionnaires (attitudinal statements).^{80,81} For the evaluation of the tools developed in this study, specific questionnaires structured as 5-point Likert scales and containing construct indicators were developed for each group. A construct is the theme, characteristic, or concept that researchers seek to measure. Herein, constructs correspond to the participants' attitudes toward each element of the learning tools (3D models, VR and AR environments, audio descriptions, and the color-changing interface). Since attitude cannot be measured directly without uncertainties (which arise from the subjectivities of the participants), it is possible to obtain reasonable values for the constructs through answers to specific statements

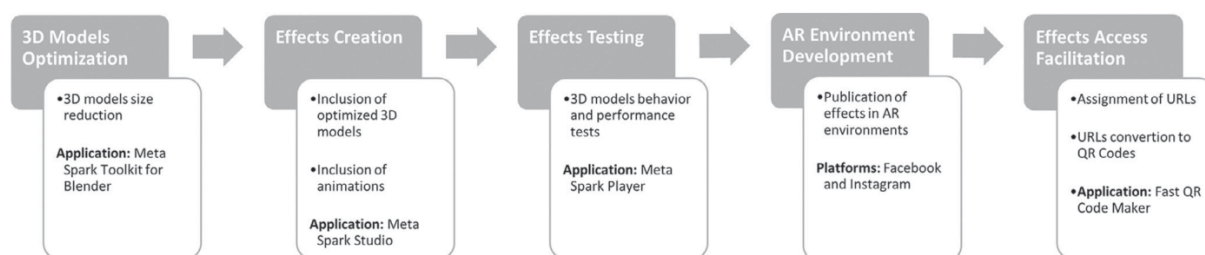
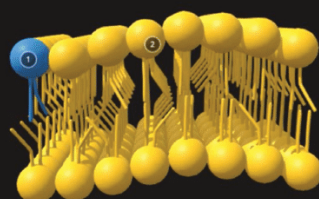


FIGURE 2 Workflow, actions, applications, and platforms necessary for the development of AR-based teaching tools.

Movement of Phospholipids: Rotation



VIDEO 2 Compilation of several animated 3D models developed during this study (Timestamp: 00:01:053). Video content can be viewed at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.70024>.

(indicators).⁸² During evaluation, respondents were encouraged to express the intensity of their agreement (strongly disagree, disagree, neutral, agree, or strongly agree) with statements about each element of the learning tools. Statements sought to extract information regarding satisfaction with using the tools, quality of visual presentation, ease of use, quality and reliability of content, effectiveness, and suitability. By inspecting these indicators, we assessed their internal consistency and determined whether they were truly capable of measuring the construct to which they belong.

Data collected from all groups were anonymized by removing information capable of identifying their owners.⁸³ Data regarding gender, age, and course were plotted on individual spreadsheets and processed separately. Descriptive data are presented as absolute numbers, percentages, mean, and standard deviation (SD). In order to measure reliability, the answers to the questionnaires were converted into scores (strongly disagree=1, disagree=2, neutral=3, agree=4, and strongly agree=5) and used to calculate the Cronbach's Alpha coefficient in the IBM SPSS Statistics.⁸⁴ The alpha values range from 0 to 1.0, with higher values indicating greater internal consistency among the indicators.⁸² Specifically, values above 0.80 indicate almost perfect consistency, 0.61 to 0.80 suggest substantial consistency, 0.41 to 0.60 reflect moderate consistency, 0.21 to 0.40 indicate reasonable consistency, and values below 0.21 show small consistency. The higher the internal consistency, the greater the reliability of participants' responses.⁸⁵

RESULTS

Development of 3D models

The modeling stage resulted in the development of 32 models related to plasma membrane and endomembrane structure and function, including: 3 static models representing the plasma membrane, saturated, and unsaturated phospholipid structures; 3 animated

models representing phospholipid movements in the membrane (rotation, lateral diffusion, and flip-flop); 6 animated models depicting membrane transport classified by direction and performed by channel and carrier proteins (uniport, symport, and antiport); 4 animated models of passive transport (simple diffusion, osmosis, diffusion facilitated by channel protein, and diffusion facilitated by carrier protein); 6 animated models of active transport (primary, secondary, receptor-mediated endocytosis, pinocytosis, phagocytosis, and exocytosis); 9 static models of membrane specializations and junctions (microvillus, stereocilium, cilium, zonula occludens, zonula adherens, desmosome, hemidesmosome, gap junction, and focal adhesion); and 1 animated model of the electron transport chain immersed in the inner mitochondrial membrane. Video 2 showcases a compilation of several animated 3D models we developed.

Since each structural component of the 3D models was modeled individually, a complete model was built from smaller 3D objects. For example, the static plasma membrane model was composed of several individual objects representing phospholipids, proteins, and carbohydrates (Figure 3). This individualization of components increased the modeling precision and facilitated improvements in Blender software. As individual "materials," such as color, texture, and other visual properties, were assigned to each structural component in Blender, the development resulted in distinct appearances for the model's objects, and consequently, visually enriched and reliable 3D models.

Modeling and improvement of animated 3D models followed the same procedure as static 3D models. However, the development of animations demanded the use of other Blender native tools. To create the short and repeatable animations of individual objects in the second type of 3D models, the Dope Sheet was used. This Blender feature allows animators to control the starting and ending points of an animation (keyframes) in a timeline.⁸⁶ For example, to design the rotation animation performed by a plasma membrane phospholipid, a keyframe was first defined as the animation starting point. Then, the phospholipid was rotated 45

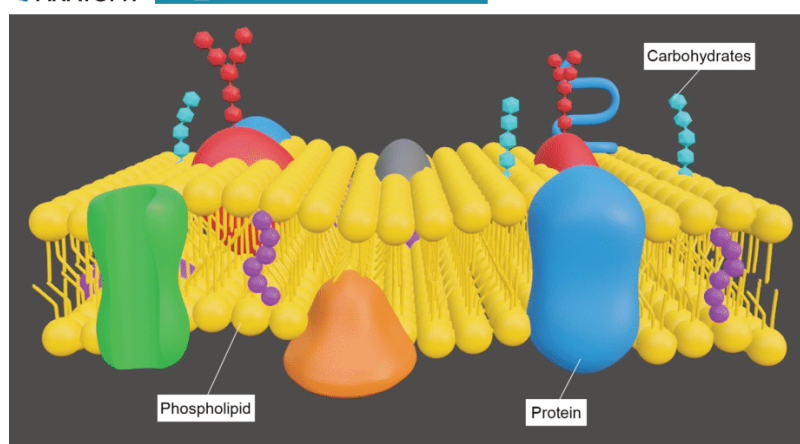


FIGURE 3 Example of a static 3D model developed. The plasma membrane model features individualized 3D objects representing each structural component (phospholipids, proteins, and carbohydrates).

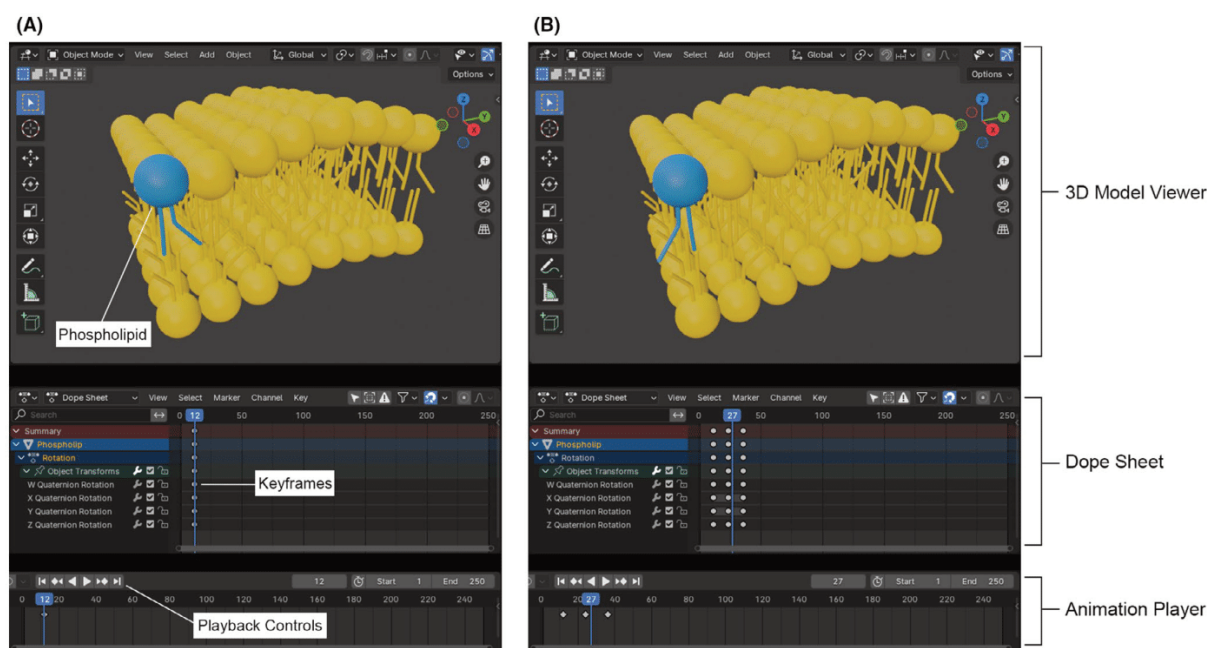


FIGURE 4 Details of Blender's interface, showing the 3D model viewer (top) and its content, a blue phospholipid at the left edge of the plasma membrane. To illustrate the creation process of a short and repeatable rotation animation, as shown in (A), phospholipid's original position was defined in the 3D model viewer. Then, a keyframe (white dot) was manually created on the angle rotation axis (W) in the Dope Sheet's timeline (middle), marking the beginning of the animation. In (B), the phospholipid was rotated and new keyframes were defined at the object's new position. No changes were made to the phospholipids' position on the X, Y, and Z axes (width, height, and depth, respectively), thus, Dope Sheet automatically created keyframes at original positions on these axes. The Animation Player (bottom) has a playback control panel, allowing the animator to replay the movements and to adjust the keyframe's (white diamonds) position in the Animation Player timeline. The use of Dope Sheet's timeline and Animation Player's timeline is interchangeable. Consequently, changes to one timeline will affect the other one.

degrees on its own axis, and some frames were advanced in the timeline. A new keyframe was defined to indicate the new position of the phospholipid. This procedure was repeated until the phospholipid completed a full rotation around its axis (180 degrees).

Finally, the animation was automatically set as repeatable by Blender (Figure 4).

To create the complex and simultaneous movements of objects included in the third type of 3D models, the Dope Sheet was used

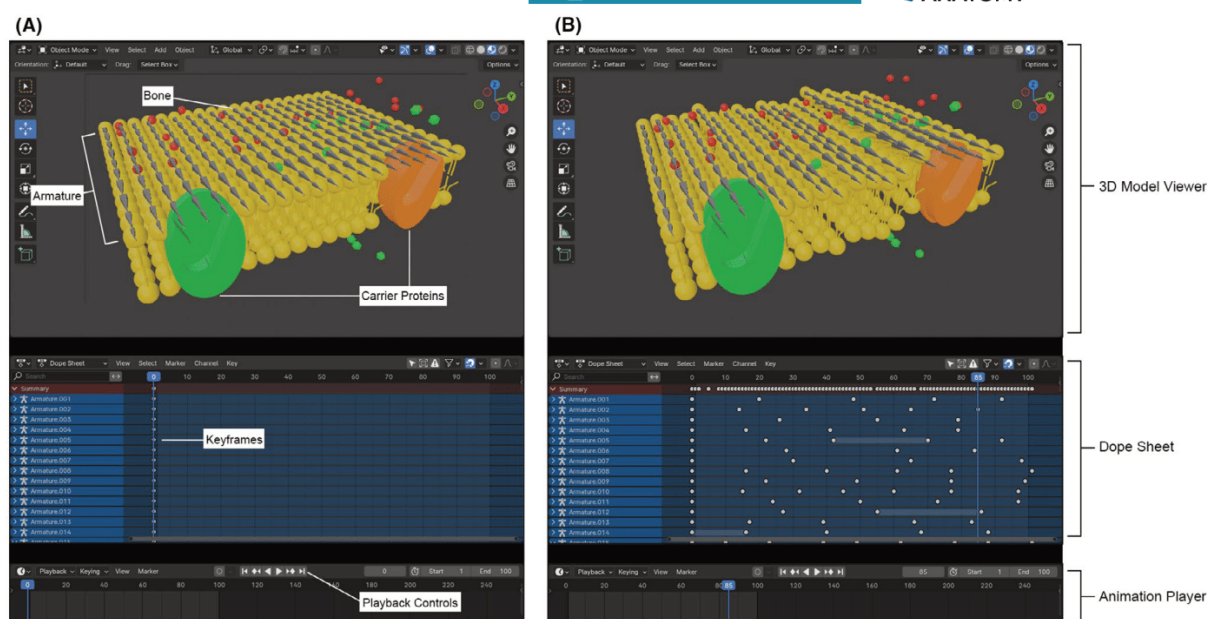


FIGURE 5 Details of Blender's interface, showing the 3D model viewer (top) and its content, a portion of plasma membrane, and spherical and square representations of particles that will be transported by carrier proteins. To illustrate the creation process of the simultaneous ascending and descending movements of phospholipids, as shown in (A), each phospholipid was linked by bones (gray arrows) in armatures (horizontal set of bones). The armatures' original positions were defined in the 3D model viewer. Then, keyframes (white dots) were manually created for each armature on the height axis (Y) in the Dope Sheet's timeline (bottom), marking the beginning of the animation. In (B), the armatures' heights were increased or decreased and new keyframes were defined at the new positions. No changes were made to the armatures' positions on the X, Z, and W axes (width, depth, and rotation angle, respectively); thus, Dope Sheet automatically created keyframes at original positions on these axes.

along with “bones” and “armatures.” Bones are Blender elements that, when linked hierarchically to specific objects, allow the movement of these objects according to the animator's instructions. An armature, in turn, is formed by bones joined together (Figure 5). Therefore, instead of animating one object at a time, it is possible to animate them together in Dope Sheet by linking them in the same armature.⁸⁷ For example, the 3D model representing the process of facilitated diffusion presents the ascending and the descending movements performed by phospholipids to maintain the plasma membrane's fluidity (Figure 5). To create these movements, the phospholipids located in a row were individually linked by horizontal bones in the same armature in a parent-child hierarchical pattern (bone=parent, phospholipid=child). In the Dope Sheet, different keyframes were successively defined at each change in the armature's position until the up and down movements were accomplished.

Additionally, Dope Sheet was used to create the individual and consecutive movements of objects included in the inner mitochondrial membrane 3D model. This representation depicts the electron transport chain where the rhythmic movement of electrons through protein complexes promotes the flow of protons from the mitochondrial matrix to the intermembranous space. A new batch of protons is sent from one compartment to another as the electrons reach the next protein complex. While protons are transported, the movement of electrons pauses, and they are retained in the current protein

complex. To create these numerous and consecutive animations, keyframes were defined, when necessary, for each object in Dope Sheet's timeline (Figure 6).

VR environment development

Once the modeling was completed, the VR environment was developed in Visual Studio Code, resulting in a browser-compatible web page with a three-part layout: 3D model manipulation area, color-changing interface, and audio description area (Figure 7).

The 3D model manipulation area features the 3D models hosted in Sketchfab and the interactive labels and allows 3D model exploration via mouse commands, as follows: (i) rotation is executed by holding down the left button and moving the mouse up, down, left, or right; (ii) position adjustment is achieved by holding down the right button or the scroll wheel and moving the mouse up, down, left, or right; (iii) zooming in is accomplished by rolling the scroll wheel forward or left double-clicking on the model; and (iv) zooming out is achieved by rolling the scroll wheel backward or left double-clicking on the background. Video 3 demonstrates the mouse-based interaction with a 3D model within the VR environment.

After developing the basic functionalities of the VR environment, some accessibility features were implemented to improve 3D models'

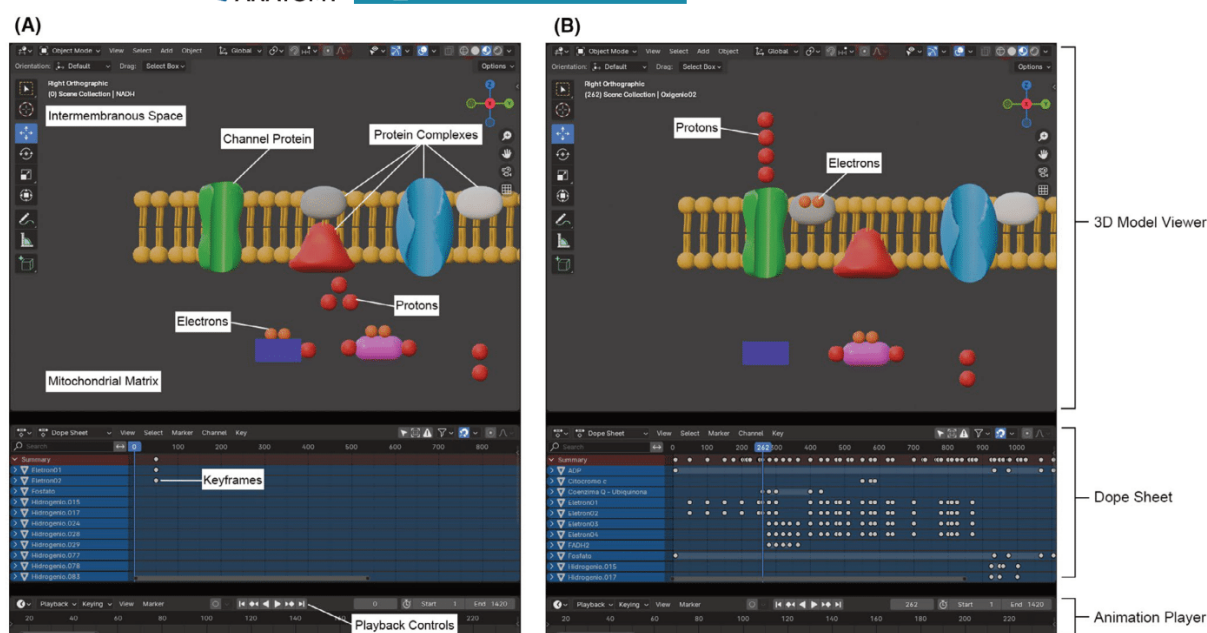


FIGURE 6 Details of Blender's interface, showing the 3D model viewer (top) and its content, a portion of the inner mitochondrial membrane and its protein complexes, and part of the mitochondrial matrix filled with transport chain particles, including electrons (orange spheres) and protons (red spheres). To illustrate the creation process of consecutive movements performed by electrons and protons, as shown in (A), keyframes (white dots) were defined in the original positions of each object, in the Dope Sheet's timeline (bottom), marking the beginning of the animation. In (B), each object was individually moved to its next position. Movement was paused when a keyframe was duplicated and moved in the timeline with no change in the objects' position. Procedure was repeated for each object until the full animation was accomplished.

accessibility and overcome limitations imposed by diverse visual disorders or disabilities. We used colors and contrast as key factors in the implementation of accessibility parameters in 3D models, considering that, for many visually impaired people, besides colors, the contrast comprises an important element of interaction with the world.⁸⁸

To implement accessibility parameters in a web page, it is important to provide comprehensive visualization of both page layout elements (background, textual content, and buttons) and functional elements (3D models). To complete this process, it is possible to carry out different procedures, such as organizing the spatial distribution of elements strategically and applying different color and contrast patterns.

To enhance accessibility of layout elements, the web page was edited in Visual Studio Code and HTML, CSS, and JavaScript command lines were added in order to customize the appearance of page elements, thus making them contrast with each other. Among the customizations, we included a visually comfortable dark background that highlights the white textual content and provides assertive visibility. In addition, rounded white borders in buttons and selection boxes were also included.

To enhance the accessibility of functional elements, Sketchfab's Viewer API command lines were added to the web page source code in Visual Studio Code. This API was used to add a material color-changing functionality to the 3D models, allowing users to freely change the color of the model objects according with their needs and preferences. This feature was only possible because an individual

material was previously assigned to each object within a 3D model. As a result, users may switch an object's hue between primary colors (red, yellow, and blue), secondary colors (purple, green, pink, and orange), and neutral colors (black, gray, and white) using the color-changing interface. The multitude of color combinations that can be applied to 3D models may help users affected by color perception issues to overcome visualization difficulties. Contrast, in turn, may help individuals with low visual acuity to visualize both page layout elements and 3D models. For this purpose, the black background was chosen to ensure contrast between the white text and borders in the layout. Another alternative is the application of black, gray, and white to the 3D models to bring visual comfort. [Video 4](#) shows the color-changing interface in action.

Another important accessibility parameter included in the VR environment was the audio descriptions developed for each 3D model. Considering the structural complexity of plasma membrane 3D models, we standardized a protocol for creating audio descriptions. The description of objects that compose the models followed their spatial organization, so nearby structures were described sequentially. Firstly, structures in the foreground were described and then those in secondary planes, always from left to right and from top to bottom. When necessary, the position of one structure was used as a reference for the spatial description of the next. To describe the morphology of objects, familiar shapes were used (e.g., the saturated phospholipid's head was described as spherical while the tails were described as elongated,

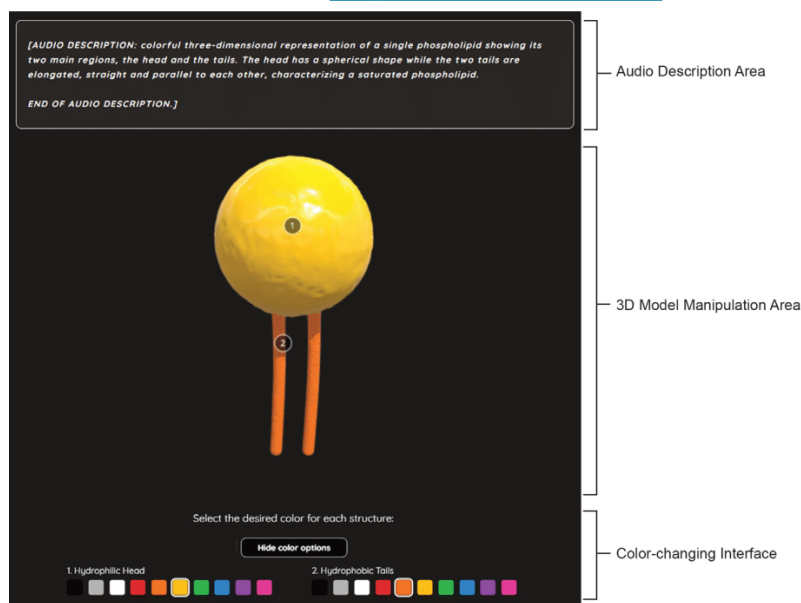


FIGURE 7 VR environment layout featuring three areas: Audio description area (top) 3D model manipulation area (middle) and the color-changing interface (bottom).



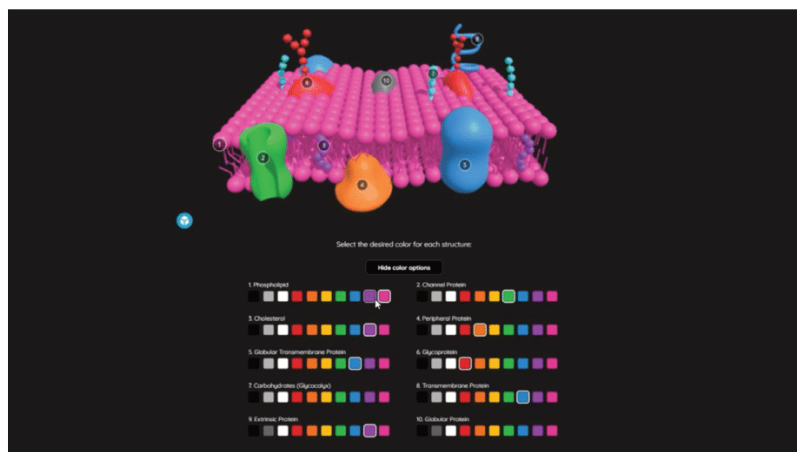
VIDEO 3 Mouse-based interaction with a 3D model within the VR environment (Timestamp: 00:00:794). Video content can be viewed at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.70024>.

straight, and parallel to each other). For models equipped with animations, the events depicted were narrated in chronological order.

It is important to highlight that audio descriptions can be used with third-party screen reader applications, such as NonVisual Desktop Access.⁸⁹ To be properly recognized by this software, audio descriptions must be differentiated from other textual content. Accordingly, audio descriptions were denoted within square brackets, preceded by the word “AUDIO DESCRIPTION” and followed by the sentence “END OF AUDIO DESCRIPTION” every time they were included in the VR environment.

People with reduced mobility or other disabilities that impact mouse usage often use keyboards to navigate web pages. Appropriately, color selection boxes can be hidden by pressing a button located in the color-changing interface, and audio description areas were strategically positioned at the top of the VR environment. Both features make the VR environment design more responsive and facilitate access for those users (Figure 7).

The implementation of the accessibility parameters was validated by technicians from the Accessibility and Inclusion Nucleus (NAI), a reference center in supporting members of the UFMG



VIDEO 4 Color-changing interface demonstration (Timestamp: 00:07:524). Video content can be viewed at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.70024>.

community with physical, sensory, or intellectual disabilities and special educational needs.⁹⁰

3D models optimization and incorporation in social media AR environments

In 3D technology, models are structured with surfaces made up of triangles that define their shapes. Complex surfaces require more triangles for accurate representation, resulting in heavier 3D models.⁹¹ Optimizing these models is crucial for seamless integration with social media AR environments, which rely on an internet connection to download assets to users' devices. Optimization in Meta Spark Toolkit for Blender was performed to reduce the triangle count of 3D models, resulting in lighter models that can be quickly downloaded and accessed on smartphones (Figure 8).

After optimization, 3D models were imported to Meta Spark Studio, a software whose interface allows the design of effects intuitively (Figure 9). The development of AR effects consisted of making specific adjustments to the 3D models' size and position in the Meta Spark Studio viewport. The simulator window was used to verify the effectiveness of the adjustments, as it enables real-time viewing of changes. Secondly, the patch editor was used to add Meta Spark Studio library patches to the AR effects, allowing users to manipulate 3D models by touching their devices' screens. Finally, animations present in the 3D models were incorporated into the AR effects.

After the development was completed, each AR effect was submitted to functional tests in Meta Spark Player (Figure 10). Testing consisted of checking the size and position of the 3D model on the screen and measuring responsiveness to user commands, demonstrating that these parameters were achieved.

After successful testing and using the publishing tool present in Meta Spark Studio, the effects featuring the 3D models were uploaded to Facebook and Instagram AR environments. The effects

were made public after analysis by the platforms to ensure compliance with their policies.⁹² From this moment, they became available for use on portable devices by accessing URLs or scanning QR codes previously produced.

Following the provided access, users may be redirected to the social media platforms and instructed to point their devices' rear camera at a real-world surface. Optimized 3D models may then be projected over the chosen surface, and users can interact with them through gestures performed on the touch screen, such as: (i) horizontal rotation achieved by placing one finger on the 3D model and simultaneously dragging a second finger to the left or right; (ii) position adjustment executed by dragging a finger up, down, left, or right; and (iii) zooming in and zooming out accomplished by pinching and performing closing and opening movements, respectively. Video 5 demonstrates the gesture-based interaction with a 3D model within the AR environment.

Application and evaluation

A total of 69 sighted students enrolled in two different undergraduate courses in the biological and health areas (Biomedicine and Pharmacy) participated in the application and evaluation of the developed learning tools. Most students were enrolled in Pharmacy ($n=48$; 70%), whereas the remaining were enrolled in Biomedicine ($n=21$; 30%). As summarized in Table 1, 20 of these students were male (29%) and 49 were female (71%). The average age was similar between male (19.7) and female (19.2) participants. Regarding the students with visual impairments, a total of 16 students participated in this study, distributed across 9 undergraduate courses in the biological and health areas: Aquaculture, Biological Sciences, Biomedicine, Medicine, Nursing, Occupational Therapy, Pharmacy, Speech Therapy, and Veterinary Medicine. The group consisted of 7 male participants (44%) with an average age of 20.3 years and 9 female participants (56%) with an average age of 20.7 years.

As we previously mentioned, operational training for students with visual impairments was extended until they were able to use the learning tools independently. During operation, students reported no difficulties in manipulating the 3D models or changing their colors. However, a student with low vision faced challenges reading audio descriptions and other texts (such as labels, legends

and instructional sentences) in the VR environment, and recommended increasing the font size. This suggestion was incorporated, and students were also informed that larger font sizes could be achieved by using different zoom levels in their browsers. Popular browsers support native zooming up to 500%,^{93–95} which can significantly enhance the experience for users with low vision, eliminating

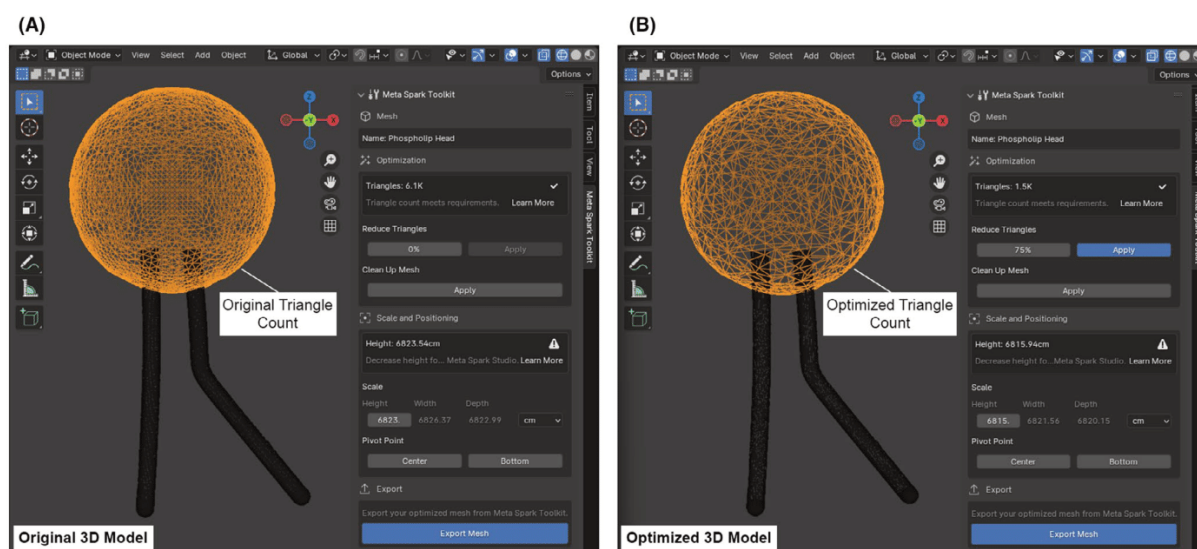


FIGURE 8 Comparison between the unsaturated phospholipid original 3D model (A) and its appearance after optimization (B) in Meta Spark Toolkit for Blender.

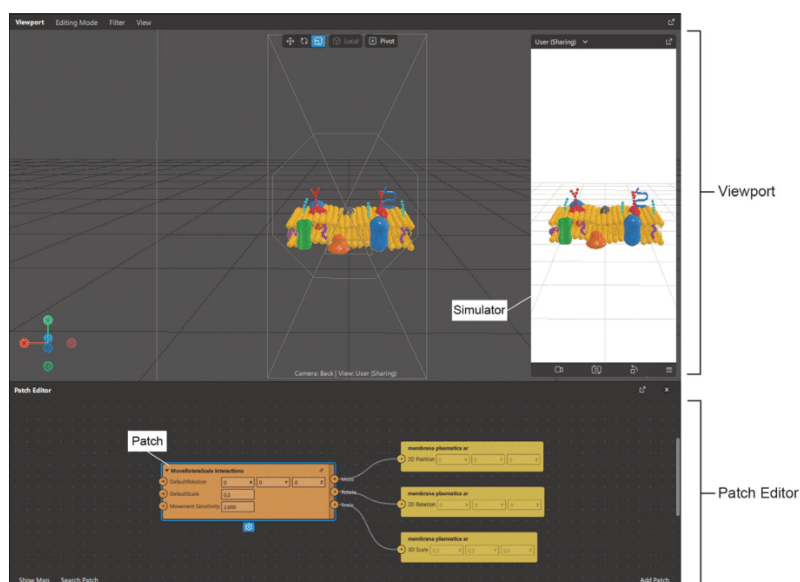


FIGURE 9 Details of Meta Spark Studio's interface, showing the development of the AR effect that features the plasma membrane optimized 3D model. The viewport (top) was used to adjust the 3D model's size and position. The simulator displayed adjustments as they were performed. The patch editor (bottom) allowed the configuration of patches that interpret touches performed on users' device screens.

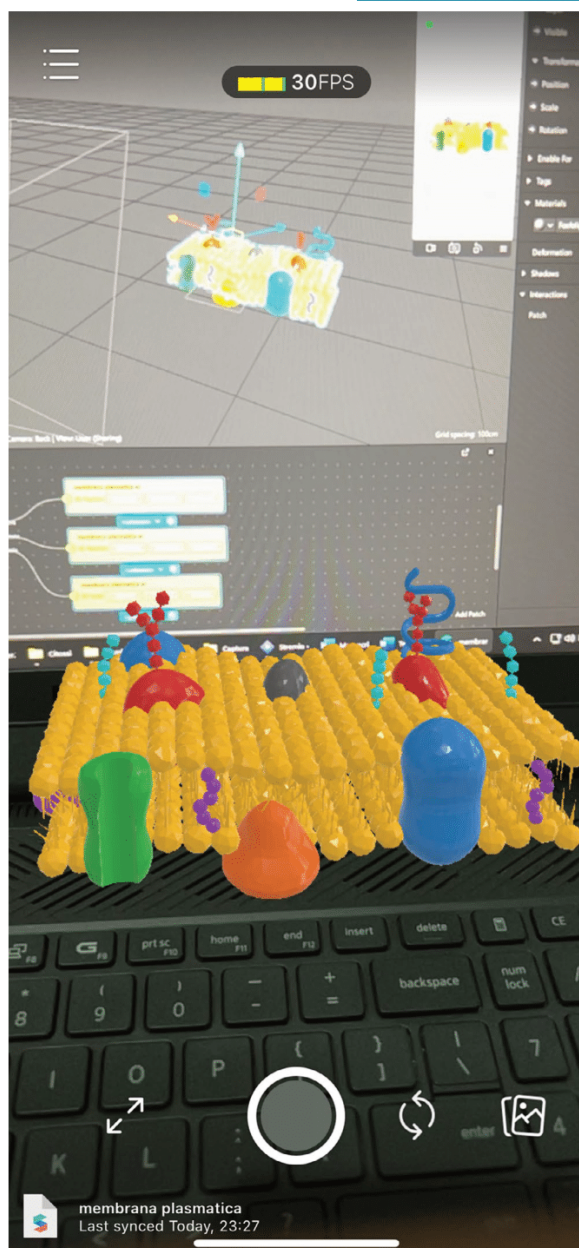


FIGURE 10 Details of Meta Spark Player's interface, showing the testing process of the AR effect that features the plasma membrane-optimized 3D model.

the need for additional magnification software installation on their computers.

During application, students were initially stimulated to explore the tools individually, firstly, to further consolidate the instructions received during operational training and, secondly, to familiarize them with the learning tools in the specific conditions of their own devices (screen type and size, operating system, and connectivity). Given the various exploration possibilities we created (e.g., compatibility with

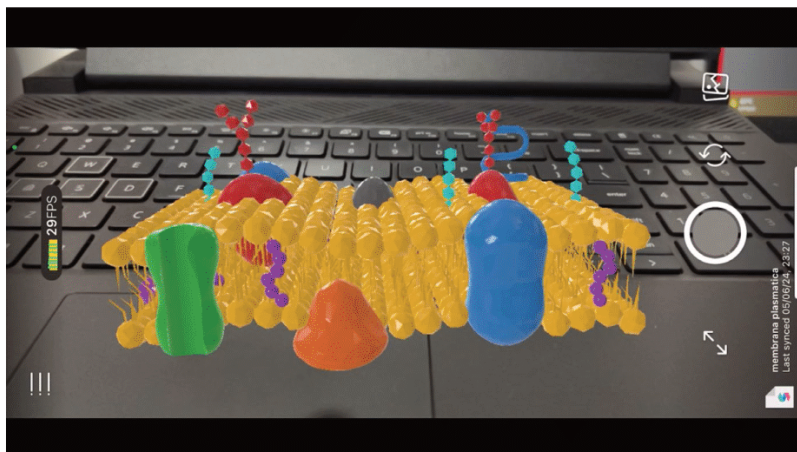
numerous different devices, no need for additional software installation, easiness of use in built-in browsers, and interaction by mouse or touch screen), the levels of immersion achieved by the students were as great as those offered by their device's features. Both students with low vision and sighted ones praised the ability to interact with the learning tools on screens of different sizes, indicating that the ease of use progressively increased on larger screens. They also demonstrated satisfaction with the ease of scrolling content on touch screens and, even on computers lacking this feature, the mouse-driven interaction did not present major difficulties.

Digital technologies not only empower students to thrive individually, by increasing their protagonism, but they also promote collaborative learning by creating environments that facilitate effective teamwork.²⁸ In this sense, we also encouraged them to interact with the learning tools in a shared way. We observed students working in groups, sharing devices, and actively engaging with the tools together. Once engaged, they exchanged their experiences, assisted one another in navigating the learning tools, and shared the knowledge acquired through them, creating an environment of mutual learning (Figure 11).

The evaluation provided by the sighted students after application is summarized in Table 2. Sighted students' attitudes toward all the learning tools were quite positive, as indicated by the high mean agreement scores (intensities) for each statement. Sighted students expressed satisfaction with the experience, visual presentation, organization, ease of use, and quality of all learning tools. Additionally, the low standard deviations for each indicator demonstrate the uniformity in the students' agreement levels. When analyzing the overall mean agreement scores, we found that the 3D models elicited the most positive attitudes from sighted students (4.82). Furthermore, when examining the set of indicators related to the attitude construct for each element, we observed high levels of reliability in the students' responses, with Cronbach's alpha exceeding 0.8 for all elements.

Similarly to sighted students, the attitudes of students with visual impairments toward all learning tools were very positive (Table 2). The mean levels of agreement were equal to or greater than 4.69, with standard deviations less than 0.5 for all indicators of each element. Interestingly, when analyzing the overall means of agreement, we observed that the attitudes toward 3D models were the most positive among students with visual impairments (4.84). The audio descriptions and color-changing interface are key accessibility features we implemented in the learning tools. Notably, students with visual impairments demonstrated extremely positive attitudes toward these elements, as reflected in the elevated mean levels of agreement within their respective constructs. Additionally, the Cronbach's alpha values of 0.84 or greater across all constructs indicated a high level of reliability in their responses.

Regarding Cell Biology teachers, a total of 13 professionals participated in the study, having worked in Cell Biology classes in 10 different undergraduate courses (Aquaculture, Biological Sciences, Biomedicine, Dentistry, Medicine, Nursing, Nutrition, Pharmacy,



VIDEO 5 Gesture-based interaction with a 3D model within the AR environment (Timestamp: 00:02:090). Video content can be viewed at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.70024>.

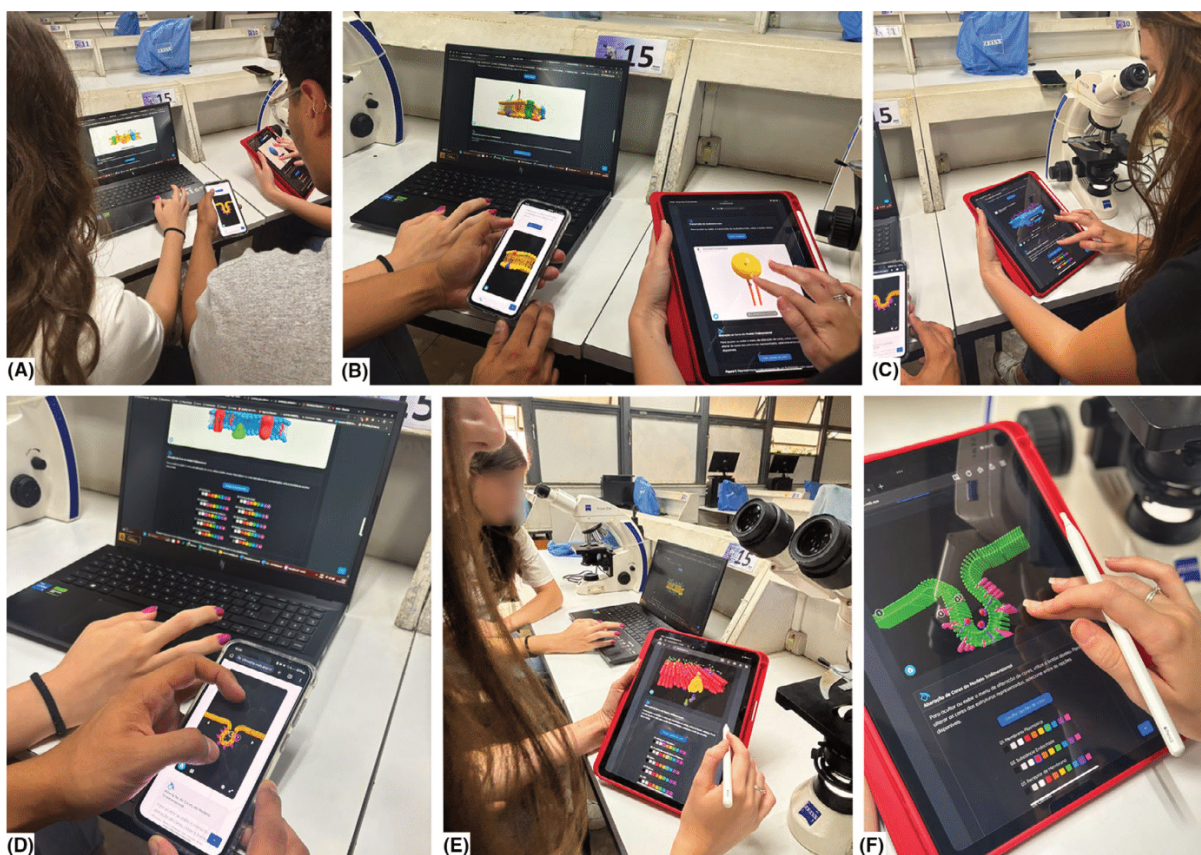


FIGURE 11 After operational training, sighted and visually impaired students were encouraged to interact with the learning tools in a shared way, which promoted socialization, engagement, assistance, and mutual learning. The high adaptability of the VR environment allowed the exploration of 3D models on devices with different screen sizes and functionalities, such as notebooks, smartphones, and tablets (A–F).

Speech Therapy, and Veterinary Medicine). Among them, 6 were male (46%) and 7 were female (54%). As summarized in Table 3, whereas 5 of these teachers had experience of 10 or more years teaching Cell Biology subjects (mean = 15.8 years) and 8 of them had a maximum of 4 years of experience (mean = 3.2 years).

Experienced and early-career teachers' opinions about all the learning tools reviews were quite similar. As summarized in Table 4, both groups of teachers demonstrated positive attitudes toward all the learning tools (with high mean agreement intensities for each statement). The VR environment and 3D models were the best evaluated elements in both groups (overall means were, respectively, 4.84 and 4.67). More importantly, the majority of teachers from both groups strongly agreed that the complexity level of the 3D models and audio descriptions was compatible with the proposed learning stage and that these resources would facilitate students' understanding of the morphology and functioning of organelles and other cell structures (mean agreement intensities of 4.60 or higher). Similar to the responses of sighted and visually impaired students, the low standard deviations for the indicators and high values of Cronbach's alpha demonstrate, respectively, the uniformity and reliability of the responses obtained from both experienced and early-career teachers.

CONCLUSIONS

This study illustrated the instructional development and evaluation of inclusive Cell Biology learning tools based on VR and AR technologies for undergraduate courses. During the development, different TDIC applications were used to model, animate, and program interactive resources to enhance the understanding of plasma membrane morphology and function. Notably, our work is the first to create such an extensive library of both animate and static VR- and AR-based material, covering the structural composition of the membrane, transport mechanisms, and detailed representations of membrane specializations. Additionally, the originality of this study lies not only in the use of immersive technologies, but also in the focus on accessibility. We have meticulously designed and tested the learning tools herein described to ensure their effectiveness for sighted students and those with visual impairments. Results from sighted and visually impaired students, as well as teachers' evaluation, indicate that the learning tools are fit for their purpose and suitable for undergraduate students. It is also important to highlight

the high general acceptance of the learning tools by students and teachers from different undergraduate courses in the biological and health areas, which indicates the suitability of the tools for distinct audiences and educational contexts.

The development of accessibility mechanisms comprised an important contribution to this study, as they play an important role in the proper education of students with visual impairments enrolled in undergraduate courses in the biological and health areas. Finally, this research can be helpful to inspire educators, researchers, artists, and developers to create immersive learning tools.

The developmental process for creating inclusive learning tools focused on the structure and functioning of cell membranes required extensive research, including preparation, prototyping, testing, and modification stages. Findings from each of these stages generated interpretations, discussions, and improvements to the tools. Considering the difficulties in developing tools based on digital technologies (lack of funding, equipment, or technical skills) by education professionals, we provided, in an unprecedented way, a systematic description of our results to serve as a roadmap for easy replication and adaptation within the educational community, aiming to foster the creation of new learning tools and approaches.

The use of digital technologies in education is rapidly expanding, but there are still significant gaps in their effective application and outcomes. Previous studies have highlighted the utilization of 3D modeling and printing to investigate subcellular structures and to teach Histology and Anatomy.^{96,97} However, a disparity persists between the technologies employed by educators and those accessible to students, which may result in ineffective pedagogical approaches.⁹⁸ To address the underutilization of digital technologies in educational contexts, our study sought to align with the increasing global trend of integrating technologies, specifically focusing on popular ones, like VR and AR. Our unique approach to development, testing, and validation aimed to narrow the gap between educators and students' perspectives, enhancing learning experiences related to cell membranes by utilizing the benefits of these technologies.

VR is a versatile technology that allows the development of comprehensive 3D models, either by highlighting relevant structural aspects (as molecules present in membrane specializations) or by animations that describe complex cell processes (as membrane transport), bypassing limitations imposed by more traditional learning materials, such as textbooks. In the present work, we explored the use of VR technology to facilitate the understanding of the morphology of cell membranes and the role played by these structures

TABLE 1 Descriptive statistics of sighted and visually impaired students' genders and ages.

Sighted students					Visually impaired students				
Gender			Age		Gender			Age	
	N	Percent	Mean	SD		N	Percent	Mean	SD
Male	20	29	19.7	±1.7	Male	7	44	20.3	±2.2
Female	49	71	19.2	±1.4	Female	9	56	20.7	±2.4
Group total	69	100			Group total	16	100		

TABLE 2 Descriptive statistics of sighted and visually impaired students attitudes toward the learning tools.

Construct	Indicator	Sighted students			Visually impaired students		
		Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α	Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α
Attitudes toward the VR environment	I am satisfied with the experience provided by the VR Environment	4.71 $\pm$ 0.517	4.71	0.837	4.75 $\pm$ 0.447	4.73	0.869
	VR Environment has a good visual presentation and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.72 $\pm$ 0.482			4.75 $\pm$ 0.447		
	VR Environment is functional and organized, as I easily located information and topics of interest when browsing it	4.71 $\pm$ 0.545			4.69 $\pm$ 0.479		
Attitudes toward the AR environment	I am satisfied with the experience provided by the AR Environment	4.78 $\pm$ 0.415	4.73	0.856	4.75 $\pm$ 0.447	4.79	0.845
	AR Environment has a good visual presentation and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.71 $\pm$ 0.488			4.88 $\pm$ 0.342		
	AR Environment is functional and organized, as I easily located information and topics of interest to me browsing it	4.72 $\pm$ 0.482			4.75 $\pm$ 0.447		
Attitudes toward the audio descriptions	Reading the audio descriptions texts facilitated my understanding of Cell Biology basic and advanced concepts	4.78 $\pm$ 0.481	4.70	0.859	4.75 $\pm$ 0.447	4.78	0.857
	Audio descriptions are well written and are easy to understand	4.58 $\pm$ 0.526			4.69 $\pm$ 0.479		
	Audio descriptions contain reliable, up-to-date information and were developed by consulting reliable reference material	4.74 $\pm$ 0.504			4.81 $\pm$ 0.403		
	Audio descriptions facilitated my understanding of the morphology and functioning of organelles and cell structures	4.72 $\pm$ 0.511			4.88 $\pm$ 0.342		
Attitudes toward the 3D models	3D models contain reliable, up-to-date information and were developed by consulting reliable reference material	4.80 $\pm$ 0.440	4.82	0.889	4.81 $\pm$ 0.403	4.84	0.874
	3D models facilitated my understanding of the morphology and functioning of organelles and cell structures	4.84 $\pm$ 0.407			4.88 $\pm$ 0.342		

TABLE 2 (Continued)

Construct	Indicator	Sighted students				Visually impaired students			
		Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α		Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α	
Attitudes toward the color-changing interface	I am satisfied with the experience provided by the color-changing interface	4.71 $\pm$ 0.571	4.71	0.887		4.75 $\pm$ 0.447	4.81	0.899	
	Color-changing interface has a good visual presentation and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.72 $\pm$ 0.482				4.81 $\pm$ 0.403			
	Color-changing interface is functional and organized, as I easily located information and topics of interest when browsing it	4.71 $\pm$ 0.488				4.88 $\pm$ 0.342			

TABLE 3 Descriptive statistics of experienced and early-career Cell Biology teachers.

Cell Biology teachers			Years of Cell Biology teaching	
	N	Percent	Mean	SD
Experienced teachers	5	38	15.8	$\pm$ 7.5
Early-career teachers	8	62	3.2	$\pm$ 1.1
Group total	13	100		

in cell functioning. Additionally, we explored the use of animations, which comprise more efficient learning alternatives than static illustrations. During evaluation, both sighted and visually impaired students demonstrated positive attitudes toward the VR environment and the 3D models we developed. These promising results align with other studies that highlight VR's pivotal role in the development of Cell Biology learning tools.^{99,100} By integrating VR technology, we showed that it is possible not only to enhance learning experiences but also to offer immersive environments that foster deeper engagement and understanding of complex biological concepts.

AR technology has been previously used to illustrate cell molecular aspects, such as proteins' 3D structures^{2,101,102} and DNA replication.¹⁰³ Although important, the contribution of these studies was limited to biomolecules. In our study, we explored the development of AR-based learning materials to depict morphological aspects of the plasma membrane, but also to illustrate the mechanisms of transport and membrane fluidity. Our approach demonstrated that AR technology can also be successfully used to understand the morphology and function of complex structures such as cell membranes but is not limited to biomolecule studies. More importantly, we used AR integrated with social media to increase the educational potential of the learning tools and to provide attractive and interactive experiences in familiar environments for students leading a digital lifestyle.

By integrating aspects of multisensoriality in the learning tools, we aimed to overcome the scarcity of tools suitable for both sighted and visually impaired students, seeking to create an environment where all learners can thrive academically. Students frequently face challenges in collecting, analyzing, applying, and synthesizing information essential for understanding both basic and complex biological concepts.¹⁰⁴ These challenges are particularly pronounced for students with visual impairments, who confront a lack of methodological approaches tailored to their learning needs,¹⁰⁵ and face discriminatory attitudes that hinder their integration into the group.¹⁰⁶⁻¹⁰⁹ These difficulties often result in lower completion rates, insufficient academic performance compared with their sighted peers,^{110,111} and also low self-esteem and social exclusion. The development of learning tools accessible to both sighted and visually impaired students is crucial to fostering inclusion, supporting academic achievement, and upholding ethical educational practices. Therefore, the implementation of accessibility parameters in the present learning tools not only addresses the growing presence of visually impaired students in universities but also serves as a permanence stimulation factor.

TABLE 4 Descriptive statistics of experienced early-career Cell Biology teachers' attitudes toward the learning tools.

Construct	Indicator	Experienced teachers			Early-career teachers		
		Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α	Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α
Attitudes toward the VR environment	I am satisfied with the user experience provided by the VR Environment	4.60 $\pm$ 0.548	4.73	0.882	4.88 $\pm$ 0.354	4.84	0.891
	VR Environment has a good visual presentation and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.80 $\pm$ 0.447			4.75 $\pm$ 0.463		
	VR Environment is functional and organized, as I easily located information and topics of interest when browsing it	4.80 $\pm$ 0.447			4.88 $\pm$ 0.354		
Attitudes toward the AR environment	I am satisfied with the user experience provided by the AR Environment	4.40 $\pm$ 0.548	4.53	0.833	4.88 $\pm$ 0.354	4.80	0.810
	AR Environment has a good visual presentation and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.40 $\pm$ 0.548			4.63 $\pm$ 0.518		
	AR Environment is functional and organized, as I easily located information and topics of interest when browsing it	4.80 $\pm$ 0.447			4.88 $\pm$ 0.354		
Attitudes toward the audio descriptions	Reading the audio descriptions texts facilitated my understanding of Cell Biology basic and advanced concepts	4.60 $\pm$ 0.548	4.64	0.855	4.75 $\pm$ 0.463	4.63	0.877
	Audio descriptions are well written and are easy to understand	4.40 $\pm$ 0.548			4.38 $\pm$ 0.518		
	Audio descriptions contain reliable, up-to-date information and were developed by consulting reliable reference material	4.60 $\pm$ 0.894			4.75 $\pm$ 0.463		
	The level of complexity of the subjects covered by the audio descriptions is compatible with the learning stage for which they are proposed (graduation)	4.80 $\pm$ 0.447			4.63 $\pm$ 0.518		
	Audio descriptions facilitate students' understanding of the morphology and functioning of organelles and other cell structures	4.80 $\pm$ 0.447			4.63 $\pm$ 0.518		
	3D models contain reliable, up-to-date information and were developed by consulting reliable reference material	4.60 $\pm$ 0.894	4.67	0.850	4.88 $\pm$ 0.354	4.84	0.891
Attitudes toward the 3D models	The level of complexity of the subjects covered by the 3D models is compatible with the learning stage for which they are proposed (graduation)	4.60 $\pm$ 0.548			4.75 $\pm$ 0.463		
	3D models facilitate students' understanding of the morphology and functioning of organelles and other cell structures	4.80 $\pm$ 0.447			4.88 $\pm$ 0.354		

TABLE 4 (Continued)

Construct	Indicator	Experienced teachers			Early-career teachers		
		Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α	Mean of agreement intensities $\pm$ SD	Overall mean	Cronbach's α
Attitudes toward the color-changing interface	I am satisfied with the user experience provided by the color-changing interface	4.40 $\pm$ 0.894	4.27	0.830	4.88 $\pm$ 0.354	4.80	0.810
	Color-changing interface has a good visual presentation, and its layouts and color patterns are visually comfortable	4.00 $\pm$ 0.707			4.63 $\pm$ 0.518		
	Color-changing interface is functional and organized, as I easily located information and topics of interest when browsing it	4.40 $\pm$ 0.894			4.88 $\pm$ 0.354		

To help address inclusion issues, we firstly developed an innovative color-changing interface to the VR environment. During preliminary research and prototyping stages, we considered that including specific color combinations in 3D models that were simultaneously adapted to different visual impairments would be an arduous and inefficient task. To overcome this obstacle, we adopted a more user-centered approach: we integrated into the VR environment intuitive commands to allow users to dynamically adjust the colors of the 3D models based on their individual needs and preferences. Although simple in conception, this solution led to the creation of a powerful and intuitive tool that significantly enhances the experience of visually impaired students interacting with biological 3D models, a fact that is notably evidenced by the positive responses from both sighted and visually impaired students, who demonstrated increased engagement with the models. Moreover, taking into account the intricate structural complexity of our 3D models alongside the enhanced functionality provided by the color-changing interface, we believe our tools represent a pioneering contribution to the development of accessible and flexible educational resources for learning Cell Biology.

Secondly, we developed audio descriptions for all 3D models, which can facilitate learning for students who cannot take advantage of the visual functionalities of the tools. A previous study demonstrated the development and application of audio descriptions in biological contexts; however, it was limited to the description of static images of eukaryotic animal cells to a visually impaired high school student.¹¹² To the best of our knowledge, our study is the first to successfully adapt the technical and complex terminology used in Cell Biology to audio descriptions, providing accurate and intelligible descriptions of 3D cell structures for audiences as diverse as those present in undergraduate courses in the biological and health areas. During evaluation, students with visual impairments expressed particularly high satisfaction with audio descriptions. This positive reception demonstrated that the development protocols we adopted were effective. Interestingly, as audio descriptions detail the features of each 3D model, their playback with third-party screen readers during real-time interaction also offers benefits. Audio descriptions can systematically and intuitively guide users through the 3D models exploration, making the process even more inclusive.

During applications, most students did not demonstrate difficulty in operating the learning tools, which we first attribute to the habit of using technological devices in their daily routines. However, it is necessary to reiterate that, during development, we sought to prepare tools whose functionality and operability resembled those familiar to the students. In this sense, the development of VR and AR environments in a format as widespread as web pages was fundamental for achieving such ease of use.

The limited use of technology in creating learning materials can be attributed to financial constraints¹¹³ or a lack of technical support for educators.¹¹⁴ To address these challenges, we focused on using affordable applications and developing accessible methodologies during the design phase, ensuring that our learning tools

could be utilized across various economic contexts and by as many Cell Biology teachers as possible. During evaluation, both experienced teachers and early-career teachers demonstrated positive attitudes toward the learning tools, particularly the 3D models and audio descriptions. We believe that the use of reliable scientific sources during development resonated strongly with both groups of teachers. Furthermore, considering that both experienced and early-career teachers stated that learning tools would facilitate understanding of the morphology and functioning of organelles and other cell structures, we feel that incorporating diverse technologies in our development process accommodates different teaching styles.

Finally, the adoption of easy-to-use applications and the detailed description of the methodologies used during development sought to be clear enough to be followed by non-specialist audiences. Importantly, the developed methodologies may also be used to create tools not only for Cell Biology learning, but they may also be adapted by educators to create learning experiences in other fields of science.

LIMITATIONS AND RECOMMENDATIONS FOR FUTURE STUDIES

The positive outcomes from students' and teachers' evaluations underscored the effectiveness of the developed tools, which make us reflect on expanding the development of learning tools for other organelles, cell structures, and processes. Moreover, although very important, tools' evaluation by students with visual impairments was limited. Thus, it is imperative to increase the participation of this audience in the development process, with the aim of improving accessibility standards, as well as adopting new ones.

As previously described, a student with low vision provided impressions and suggestions, which contributed greatly to the evaluation of the learning tools. Initially, the student reported no challenges in handling 3D models and the color-changing interface, indicating that the careful implementation of accessibility features resulted in functional learning tools for users with low vision. However, as the evaluation progressed, the student reported difficulties visualizing texts present in the VR environment due to the font size. This difficulty demonstrates that, even seeking to implement global accessibility standards, it is necessary to provide additional accessibility options to meet individual needs in specific situations. This scenario makes us reflect that, although we have successfully implemented accessibility standards that use hearing and color customization to offer opportunities for inclusion in Cell Biology learning, other aspects of multisensory experiences should be explored in the future.

As we focused on the learning development of the tools themselves, we believe that the feedback provided by the students was both important to ensure the improvement of the learning tools and to extract information regarding their effectiveness and potential in learning Cell Biology. Despite these important results, we believe that comparing results from students who used the tools we

developed and from students who did not have access to them could bring a clearer understanding of the impact of these tools on Cell Biology learning. Therefore, we recognize this limitation as an important area for future investigation.

Despite the optimistic scenario of using VR and AR in the development of tools that we presented, which is supported by our promising results, it is necessary to observe the research, prototyping, and validation principles of EDR. Accordingly, new improvements and expansions must be continuously made to the tools, as new reflections become necessary and as new technologies emerge.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Júlio Panzera-Gonçalves: Conceptualization; methodology; data curation; investigation; validation; formal analysis; visualization; writing – original draft; writing – review and editing; software. **Cleida Aparecida Oliveira:** Supervision; funding acquisition; writing – original draft; writing – review and editing; project administration; resources; validation; visualization.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the support provided by the technicians from the Accessibility and Inclusion Nucleus (NAI) of the Universidade Federal de Minas Gerais (NAI-UFMG) and the voluntary collaboration of participating students.

FUNDING INFORMATION

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brazil (CAPES)—Finance Code 001 and by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)—Process APQ-05704-23.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare no conflicts of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The original contributions presented in the study are included in the article; further inquiries can be directed to the corresponding author/s.

ETHICS STATEMENT

This study was approved by the Research Ethics Committee of the Universidade Federal de Minas Gerais (CEP-UFMG) under protocol number CAAE 68680723.7.0000.5149.

INFORMED CONSENT STATEMENT

Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

ORCID

Júlio Panzera-Gonçalves  <https://orcid.org/0000-0002-1644-2546>

[org/0000-0002-1644-2546](https://orcid.org/0000-0002-1644-2546)

Cleida Aparecida Oliveira  <https://orcid.org/0000-0001-9610-7846>

[org/0000-0001-9610-7846](https://orcid.org/0000-0001-9610-7846)

REFERENCES

- Michelotti A, EL Loreto da S. Use of tattooed didactic models as methodology for the teaching of cellular biology in inclusive tours with visual disabilities. *Rev Contexto Educ* [Internet]. 2019 Aug 30;34(109):150–69. Available from: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/contextoeducacao/article/view/8686>
- Agrawal S. When molecules come to life—using augmented reality for studying protein structure in cell biology class. *FASEB J*. 2022 May 13;36(S1).
- Duda HJ, Adpriyadi A. Students' misconception in concept of biology cell. *Anatol J Educ*. 2020 Apr 1;5(1):47–52.
- Reinke NB, Kynn M, Parkinson AL. Immersive 3D experience of osmosis improves learning outcomes of first-year cell biology students. *CBE Life Sci Educ*. 2021 Mar;20(1):ar1.
- Veraszto EV, Vicente NEF. Cell biology teaching for blind students: a proposal for inclusion. *Góndola Ens Apr Cien* [Internet]. 2022 Jun 15;17(2):361–76. Available from: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/16994>
- Veselinovska SS, Gudeva LK, Djokic M. Applying appropriate methods for teaching cell biology. *Procedia Soc Behav Sci*. 2011;15:2837–42.
- Kouser S, Majid I. Technological tools for enhancing teaching and learning process. *Towards Excell*. 2021 Mar 31;13:366–73.
- Piffero E, Soares R, Coelho C, Roehrs R. Active methodologies and the teaching of biology: challenges and possibilities in the new high school. *Rev Ens Pesqui* [Internet]. 2020 Aug 20;18(2):48–63. Available from: http://periodicos.unespar.edu.br/index.php/ensin_oepesquisa/article/view/3568/pdf_123
- Mantovani ALS, Lima ARDA, Brienze SLA, Dos Santos ER, Fucuta P d S, André JC. Cell biology and histology in medicine: perception on education and student performance. *Int J Health Educ*. 2019 May 11;3(1):8–16.
- Selau B, Damiani MF, Costas FAT. Blind students in higher education: what to do with possible obstacles? *Acta Sci Educ* [Internet]. 2017 Sep 1;39(4):431. Available from: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciEduc/article/view/28915>
- Roskoski R. Guidelines for preparing color figures for everyone including the colorblind. *Pharmacol Res* [Internet]. 2017 May;119:240–1. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1043661817301664>
- Blair K, Cibis G, Zepplier M, Gulani AC. Amblyopia. *StatPearls* [Internet]. 2024 Feb 12 [cited 2025 Feb 3]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430890/>
- Balzer BWR, Catt CJ, Bou-Abdou M, Martin FJ. Visual acuity improves in children and adolescents with idiopathic infantile nystagmus. *Asia Pac J Ophthalmol*. 2018 Mar 1;7(2):99–101.
- Freeman AW, Nguyen VA, Jolly N. Components of visual acuity loss in strabismus. *Vision Res*. 1996 Mar;36(5):765–74.
- Horiguchi H, Suzuki E, Kubo H, Fujikado T, Asonuma S, Fujimoto C, et al. Efficient measurements for the dynamic range of human lightness perception. *Jpn J Ophthalmol*. 2021 May 9;65(3):432–8.
- Lintangsari AP, Emaliana I. Inclusive education services for the blind: values, roles, and challenges of university EFL teachers. *Int J Eval Res Educ*. 2020 Jun 1;9(2):439.
- Pandey RK. Comparative study of adjustment of visually impaired students. *Univ J Educ Res*. 2018;6(11):2562–71.
- Castro HC. Inclusive education: a brief look on inclusive education, blindness, educational resources and the biological area. *Rev Práx* [Internet]. 2015 Oct 2;7(13). Available from: <http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/praxis/article/view/641>
- Gin LE, Guerrero FA, Cooper KM, Brownell SE. Is active learning accessible? Exploring the process of providing accommodations to students with disabilities. *CBE Life Sci Educ*. 2020 Dec;19(4):es12.
- Negash KH, Gasa V. Academic barriers that prevent the inclusion of learners with visual impairment in Ethiopian mainstream schools. *SAGE Open*. 2022 Apr 18;12(2):1–12.
- Koehler K, Wild T. Students with visual impairments' access and participation in the science curriculum: views of teachers of students with visual impairments. *J Sci Educ Stud Disabil*. 2019 Sep 6;22(1):1–17.
- Santiago SA, de Carvalho HF. Frailty in the teaching of meiosis. *Ciênc Educ (Bauru)* [Internet]. 2020;26. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-7313202000100220&tlng=pt
- dos Santos DAN, Schlünzen ETM, Junior KS. Teachers training for the use of digital technologies. *Univ J Educ Res* [Internet]. 2016 Jun;4(6):1288–97. Available from: http://www.hrp.org/journals/article_info.php?aid=3799
- Voltolini AGMF d F. Digital tools and the school: study of a pedagogical proposal. *Rev Obs* [Internet]. 2019 May 1;5(3):293–316. Available from: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/observatorio/article/view/5776>
- de Siqueira GC, Sovierzoski HH, Lucas LB, Coelho Neto J. Digital information and communication technologies (DICT), teacher training and zoology content: a mapping in national publications within the scope of science teaching. *Res Soc Dev* [Internet]. 2020 May 28;9(7):e617974496. Available from: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4496>
- Valente JA. Integração Currículo e Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação: a passagem do currículo da era do lápis e papel para o currículo da era digital. In: Cavalheri A, Engeroff SN, Silva JC, editors. *As Novas Tecnologias e os Desafios para uma Educação Humanizadora*. 1st ed. Santa Maria: Biblos Editora; 2013. p. 113–32.
- Van Daele T, Frijns C, Lievens J. How do students and lecturers experience the interactive use of handheld technology in large enrolment courses? *Br J Educ Technol*. 2017 Nov 4;48(6):1318–29.
- Haleem A, Javaid M, Qadri MA, Suman R. Understanding the role of digital technologies in education: a review. *Sustain Oper Comput*. 2022;3:275–85.
- Lazarowitz R, Naim R. Learning the cell structures with three-dimensional models: students' achievement by methods, type of school and questions' cognitive level. *J Sci Educ Technol*. 2013 Aug 29;22(4):500–8.
- Chuang TF, Chou YH, Pai JY, Huang CN, Bair H, Pai A, et al. Using virtual reality technology in biology education. *Am Biol Teach*. 2023 Jan 1;85(1):23–32.
- Ozdemir M, Sahin C, Arcagok S, Demir MK. The effect of augmented reality applications in the learning process: a meta-analysis study. *Eur J Educ Res*. 2018 Apr 4;18:1–22.
- Bennett JA, Saunders CP. A virtual tour of the cell: impact of virtual reality on student learning and engagement in the STEM classroom. *J Microbiol Biol Educ*. 2019 Jan;20(2):20.2.37.
- Cipresso P, Giglioli IAC, Raya MA, Riva G. The past, present, and future of virtual and augmented reality research: a network and cluster analysis of the literature. *Front Psychol*. 2018 Nov 6;9:2086.
- Gigante MA. Virtual reality: definitions, history and applications. *Virtual reality systems*. Boston: Elsevier; 1993. p. 3–14.
- Netto VA, Machado L d S, Oliveira MCF d O. *Realidade virtual: fundamentos e aplicações*. Florianópolis: Visual Books; 2002. 94 p.
- de Byl P. Making Web3D less scary: toward easy-to-use Web3D e-learning content development tools for educators. *Innov J Online Educ*. 2009;5(5):6.
- Tori R, Kirner C, Siscoutto RA. *Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada*. Porto Alegre: Editora SBC; 2006.
- Moro RG, Villanova Biasuz MC. Produzindo experiências dentro de um ambiente virtual 3D: o uso do software SculptVR. *Anais do XXVI Workshop de Informática na Escola (WIE 2020)*.

- Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação—SBC; 2020. p. 179–88.
39. Ba R, Xie Y, Zhang Y, Taib SFBM, Cai Y, Walker Z, et al. Virtual reality enzymes: an interdisciplinary and international project towards an inquiry-based pedagogy. In: Cai Y, van Joolingen W, Walker Z, editors. VR, simulations and serious games for education. Singapore: Springer; 2019. p. 45–54.
 40. Laubscher H, Loos B, Theart RP. Engage and learn: improved learning of cellular structures using a virtual reality-based learning experience. *Comput Educ X Real*. 2024 Dec;5:100089.
 41. Kirner C, Kirner TG. *Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada. Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências*. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Computação; 2011. p. 10–25.
 42. Azuma R, Bailiot Y, Behringer R, Feiner S, Julier S, MacIntyre B. Recent advances in augmented reality. *IEEE Comput Graph Appl*. 2001;21(6):34–47.
 43. Turhan B, Gümüş ZH. A brave new world: virtual reality and augmented reality in systems biology. *Front Bioinform*. 2022 Apr 6;2:1–9.
 44. Hoog TG, Aufdembrink LM, Gaut NJ, Sung R, Adamala KP, Engelhart AE. Rapid deployment of smartphone-based augmented reality tools for field and online education in structural biology. *Biochem Mol Biol Educ*. 2020 Sep 30;48(5):448–51.
 45. Restrepo G, Prakash EC, Dashti SE, Castillo SAD, Gómez J, Oviedo L, et al. Extended realities for sensorially diverse children. *IEEE Comput Graph Appl*. 2024 Jul;44(4):26–39.
 46. Souto A. Step by step to make augmented reality filters for molecular models. *J Chem Educ*. 2023 Feb 14;100(2):941–5.
 47. Atabek O. Challenges in integrating technology into education. *Turk Stud Inform Technol Appl Sci*. 2019 Jan 1;14(1):1–19.
 48. Mayantao R, Tantiado RC. Teachers' utilization of digital tools and confidence in technology. *Int J Multidiscipl Res Anal*. 2024 May 9;7(5):1945–52.
 49. Rustandi J, Ansori MR, Fahlepi R, Iriansyah I, Marliat M. Teacher competence in the digital era a phenomenological study. *J Konseling Pendidikan Islam*. 2024 Oct 2;5(2):527–34.
 50. Sarva E, Puriña-Biezā KE. Educators' perspectives on the main challenges and opportunities for implementing digital solutions in learning and teaching. *Int J Emerg Technol Learn*. 2023 Dec 19;18(24):62–80.
 51. Yooyativong T. Developing teacher's digital skills based on collaborative approach in using appropriate digital tools to enhance teaching activities. 2018 Global Wireless Summit (GWS). Chiang Rai: IEEE; 2018. p. 156–60.
 52. Ertmer PA, Ottenbreit-Leftwich AT, Sadik O, Sendurur E, Sendurur P. Teacher beliefs and technology integration practices: a critical relationship. *Comput Educ*. 2012;59(2):423–35.
 53. Corrêa GCG, de Campos ICP, Almagro RC. Research-action: a practical approach to qualitative research. *Ens Pedagóg (Sorocaba)*. 2018;2(1):62–72.
 54. Hall S, Ryan H. The neglected "R": replicability, replication, and writing Center research. *Writing Center J*. 2021 Dec 1;39(1):211–32.
 55. Plomp T, Nieveen N. An introduction to educational design research: Proceedings of the seminar conducted at the East China Normal University, Shanghai (PR china), November 23–26, 2007. 3rd ed. Enschede: SLO; 2010.
 56. McKenney S, Reeves T. *Conducting educational design research*. London: Routledge; 2012.
 57. Halpin PA, Gopalan C. Teaching membrane transport concepts using flipped teaching & dramatizations. *Am Biol Teach*. 2021 May 1;83(5):337–40.
 58. Rahim FR. Facing the industrial revolution 4.0: increasing teacher competence through the technical guidance on making digital teaching materials. *Pelita Eksakta*. 2021 Mar 31;4(1):55.
 59. Barbosa JC, Oliveira AMP. Why design research in mathematics education? *Perspect Educ Mat*. 2015;8(18):526–46.
 60. Van den Akker J, Gravemeijer K, McKenney S, Nieveen N, editors. *Educational design research*. London: Routledge; 2006.
 61. Souza e Silva R, da Cunha Lima Freire G, Cerqueira GS. The impact of the integration of digital platforms and active teaching strategies (Kahoot!) on the performance of Brazilian medical course students in the discipline of histology. *Anat Sci Educ*. 2024 Sep 12;17(6):1229–38.
 62. Hexanomad. *Nomad Sculpt 1.90*. App Store. 2024.
 63. Jahagirdar K, Raleigh E, Alnizami H, Kao K, Coriveau PJ. A comprehensive stylus evaluation methodology and design guidelines. Switzerland: Springer; 2016. p. 424–33.
 64. Blender Foundation. *Blender 4.1*. 2024.
 65. Blain JM. *The complete guide to blender graphics computer modeling & animation*. New York: A K Peters/CRC Press; 2020.
 66. Aristov MM, Moore JW, Berry JF. Library of 3D visual teaching tools for the chemistry classroom accessible via Sketchfab and viewable in augmented reality. *J Chem Educ*. 2021;98(9):3032–7.
 67. Microsoft. *Visual Studio Code 1.90.0*. Microsoft; 2024.
 68. Sketchfab. *Sketchfab Viewer API Documentation [Internet]*. 2024 [cited 2024 Jun 24]. Available from: <https://sketchfab.com/developers/viewer/>
 69. dos Santos Marques JM, Valente GLF, Leal Ferreira SB, Cappelli C, Salgado L. Audio description on Instagram: evaluating and comparing two ways of describing images for visually impaired. *Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems*. Setúbal: SCITEPRESS—Science and Technology Publications; 2017. p. 29–40.
 70. Bardini F. Audio description and the translation of film language into words. *Ilha Desterro*. 2020 Jan 31;73(1):273–96.
 71. Meta Platforms. *Meta Spark Toolkit for Blender 1.3.0*. 2024.
 72. Meta Platforms. *Meta Spark Studio 181.0.0.38.248*. 2024.
 73. Meta Platforms. *Meta Spark Player 187.0*. App Store. 2024.
 74. TweakNow Software. *Fast QR Code Maker 3.0.0*. Microsoft Store. 2024.
 75. Karakuş S, Şeyihoğlu A. Student and teacher views on a sample social studies activity with QR code application. *J Inq Based Act*. 2022;12(1):70–89.
 76. Uçak E. Teaching materials developed using QR code technology in science classes. *Int J Progress Educ*. 2019 Aug 2;15(4):215–28.
 77. Hoy MB. An introduction to QR codes: linking libraries and mobile patrons. *Med Ref Serv Q*. 2011 Jul;30(3):295–300.
 78. Petrova K, Romaniello A, Medlin BD, Vannoy SA. QR codes advantages and dangers. *Proceedings of the 13th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications*. Setúbal: SCITEPRESS—Science and Technology Publications; 2016. p. 112–5.
 79. Sungkur RK, Neermul V, Tauckoor V. Exploring the educational potential of QR codes. 2016 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE). New York: IEEE; 2016. p. 368–73.
 80. Likert R. A technique for measurement of attitudes. *Arch Psychol*. 1932;22: 140 p.
 81. Matthiensen A. *Uso do Coeficiente Alfa de Cronbach em Avaliações por Questionários*. 1st ed. Boa Vista, Roraima: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro de Pesquisa Agroflorestal de Roraima Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; 2011.
 82. Hair JR, Anderson RE, Thatam RL, Black WC. *Análise Multivariada de Dados*. Porto Alegre: Bookman; 2005 600 p.
 83. Brasil. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Brasília, DF: Diário Oficial da União, n. 157, Seção 1; 2018. p. 59.
 84. IBM. *IBM SPSS Statistics 27.0.1*. North Castle: IBM; 2024.
 85. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 1977 Mar;33(1):159.

86. Hosen MS, Ahmmed S, Dekkati S. Mastering 3D modeling in blender: from novice to pro. *ABC Res Alert*. 2019 Dec 31;7(3):169–80.
87. Hess R. *Tradigital blender*. New York: Routledge; 2013.
88. Dalke H, Conduit GJ, Conduit BD, Cooper RM, Corso A, Wyatt DF. A colour contrast assessment system: design for people with visual impairment. *Designing inclusive interactions*. London: Springer London; 2010. p. 101–10.
89. NV Access. *NonVisual Desktop Access 2024.1.0.31547*. 2024.
90. NAI. Núcleo de Acessibilidade e Inclusão da UFMG. 2022 [cited 2024 May 1]. Available from: <https://www.ufmg.br/nai/>
91. Hess R. *Blender Foundations*. New York: Routledge; 2013.
92. Meta Platforms. *Spark AR Review Policies* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jun 24]. Available from: <https://spark.meta.com/learn/public/shing/spark-ar-review-policies/>
93. Google. *Setting Accessibility in Google Chrome* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jun 28]. Available from: <https://support.google.com/chrome/answer/96810>
94. Microsoft. *Accessibility Features in Microsoft Edge* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jun 28]. Available from: <https://support.microsoft.com/en-us/microsoft-edge/accessibility-features-in-microsoft-edge-4c696192-338e-9465-b2cd-bd9b698ad19a>
95. Mozilla. *Accessibility Features in Firefox* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jun 28]. Available from: <https://support.mozilla.org/en-US/kb/accessibility-features-firefox>
96. Gurdon Institute. *The Cell Explorer* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jul 1]. Available from: <https://scopegurdoninstitute.co.uk/digital-toolkit-1-investigate-the-cell-3d-model>
97. da Silva RV, Peres A, Moreira ID, Machado MH, de Braga ES, Gonçalves T d O, et al. 3D printing as a promoter of inclusive and creative education on cell biology. *XIX Congress of the Brazilian Society for Cell Biology*. São Paulo; 2018. p. 94.
98. Ng'ambi D. Effective and ineffective uses of emerging technologies: towards a transformative pedagogical model. *Br J Educ Technol*. 2013 Jul 4;44(4):652–61.
99. Johnston APR, Rae J, Ariotti N, Bailey B, Lilja A, Webb R, et al. Journey to the centre of the cell: virtual reality immersion into scientific data. *Traffic*. 2018 Feb 21;19(2):105–10.
100. Venkatesan M, Mohan H, Ryan JR, Schürch CM, Nolan GP, Frakes DH, et al. Virtual and augmented reality for biomedical applications. *Cell Rep Med*. 2021 Jul;2(7):100348.
101. Peterson CN, Tavana SZ, Akinleye OP, Johnson WH, Berkmen MB. An idea to explore: use of augmented reality for teaching three-dimensional biomolecular structures. *Biochem Mol Biol Educ*. 2020 May 23;48(3):276–82.
102. Vardar-Ulu D, Ragab SE, Agrawal S, Dutta S. Using augmented reality in molecular case studies to enhance biomolecular structure-function explorations in undergraduate classrooms. *J Microbiol Biol Educ*. 2024 Apr 16; 25(2):e0001924.
103. Dwisatyadini M, Wibawa C, Dini BF. Augmented reality for learning biology in distance education. *International Conference on Innovation in Open & Distance Learning*. South Tangerang: Indonesia Open University Institute for Research and Community Service; 2022. p. 233–9.
104. Gehring KM, Eastman DA. Information fluency for undergraduate biology majors: applications of inquiry-based learning in a developmental biology course. *CBE Life Sci Educ*. 2008 Mar;7(1):54–63.
105. Love TS, Kreiser N, Camargo E, Grubbs ME, Kim EJ, Burge PL, et al. STEM faculty experiences with students with disabilities at a land grant institution. *J Educ Train Stud*. 2014 Dec 8;3(1):27–38.
106. Ruban LM, McCoach DB, McGuire JM, Reis SM. The differential impact of academic self-regulatory methods on academic achievement among university students with and without learning disabilities. *J Learn Disabil*. 2003 May 18;36(3):270–86.
107. Getzel EE, Thoma CA. Experiences of college students with disabilities and the importance of self-determination in higher education settings. *Career Develop Excep Individ*. 2008 Aug 2;31(2):77–84.
108. Kauffman JM, Anastasiou D, Felder M, Lopes J, Hallenbeck BA, Hornby G, et al. Trends and issues involving disabilities in higher education. *Trends High Educ*. 2022 Dec 23;2(1):1–15.
109. Marshak L, Van Wieren T, Ferrell D, Swiss L, Dugan C. Exploring barriers to college student use of disability services and accommodations. *J Postsecond Educ Disabil*. 2010 Jan 1;22:151–65.
110. Reed M, Curtis K. Experiences of students with visual impairments in Canadian higher education. *J Vis Impair Blind*. 2012 Jul 7;106(7):414–25.
111. Firat T. Experiences of students with visual impairments in higher education: barriers and facilitators. *Br J Spec Educ*. 2021 Sep 9;48(3):301–22.
112. do Nascimento EJP, Ribeiro EN. Audio description in biological sciences teaching: an experience in high school teaching about cells. *Educ Online* [Internet]. 2023 Apr 24;18(42):e231810. Available from: <http://educacaoonline.edu.puc-rio.br/index.php/educonline/article/view/1304>
113. Schoepp K. Barriers to technology integration in a technology-rich environment. *Learn Teach High Educ Gulf Perspect*. 2005 Jun 1;2(1):56–79.
114. Johnson AM, Jacovina ME, Russell DG, Soto CM. *Challenges and solutions when using technologies in the classroom. Adaptive educational technologies for literacy instruction*. New York, NY: Routledge; 2016. p. 13–30.

AUTHOR BIOGRAPHIES

Júlio Panzera-Gonçalves M.Sc., is a teacher of Science and Biology and a Ph.D. student in the Cell Biology Graduate Program at the Federal University of Minas Gerais, Brazil. His research interest is in the development of teaching materials for teaching Cell Biology and morphology.

Cleida Aparecida Oliveira, Ph.D., is a full professor in the Department of Morphology at Federal University of Minas Gerais, Brazil. She is accredited in the Cell Biology Graduate program, where she coordinates the didactic internship subjects, since 2009. Her research interest is in Cell Biology, Morphology and Teacher training. She is also interested in educational programs to promote scientific literacy in undergraduate and basic education.

How to cite this article: Panzera-Gonçalves J, Oliveira CA. Development, application, and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes. *Anat Sci Educ*. 2025;18:462–484. <https://doi.org/10.1002/ase.70024>

Artigo 3: Desenvolvimento e validação de site inclusivo de ensino de Biologia Celular baseado em realidade virtual e realidade aumentada

Desenvolvimento e validação de site inclusivo de ensino de Biologia Celular baseado em realidade virtual e realidade aumentada

Júlio Panzera-Gonçalves¹, Cleida Aparecida Oliveira^{2*}

1 - Departamento de Morfologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil; juliopanzera@ufmg.br

2 - Departamento de Morfologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil; cleida@icb.ufmg.br

* Correspondência: cleida@icb.ufmg.br

RESUMO

A dificuldade em aprender Biologia Celular é notória entre estudantes de graduação, devido à dificuldade de abstração e interpretação de conteúdo microscópico e à grande quantidade de conceitos complexos abordados nesta disciplina. Tais dificuldades são comuns aos alunos com visão típica, mas se aprofundam para estudantes com deficiência visual, já que sua permanência nas instituições de ensino é muitas vezes comprometida pela escassez de abordagens metodológicas que favoreçam sua aprendizagem. Com intuito de implementar ambientes de aprendizagem inclusivos e mitigar a escassez de materiais de aprendizagem para alunos com visão típica e com deficiência visual, este trabalho objetivou desenvolver, aplicar e avaliar um site inclusivo de ensino de Biologia Celular usando os princípios da Pesquisa em Design Educacional (PDE), design responsivo e de acessibilidade digital, por meio das Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo da Web (WCAG 2.1). Foram modelados e incluídos no site modelos tridimensionais (3D) representativos de organelas, estruturas e processos celulares otimizados para utilização com as tecnologias de realidade virtual (RV) e realidade aumentada (RA). Foram ainda incluídos textos explicativos e parâmetros de acessibilidade para facilitar a utilização dos modelos 3D, como audiodescrições e uma interface de alteração de cores. Adicionalmente, utilizamos esquemas de cores adaptável, layout ajustável, imagens com dicas de contexto e textos alternativos para tornar o site acessível no maior número de aparelhos possível. A avaliação das ferramentas de aprendizagem foi realizada com alunos com e sem deficiência visual de cursos de graduação da área da saúde e das biológicas, bem como com professores de Biologia Celular. Os resultados revelaram atitudes positivas em relação à apresentação visual, facilidade de uso, qualidade do conteúdo e eficácia, destacando o potencial do site para aprimorar o aprendizado inclusivo em Biologia Celular para alunos de graduação.

Palavras-chave: biologia celular; aprendizagem; deficiência visual; inclusão; realidade virtual; realidade aumentada

1. INTRODUÇÃO

A dificuldade em aprender Biologia Celular é notória entre estudantes de graduação, devido à dificuldade de abstração e interpretação de conteúdo microscópico e à grande quantidade de conceitos complexos abordados nesta disciplina (BEAULIEU; PETIT-TURCOTTE, 2018). As células e suas organelas são frequentemente representadas de maneira simplificada em livros e outros materiais didáticos, o que não favorece uma aprendizagem profunda e significativa de Biologia Celular. Essa abordagem, leva os alunos a um processo de memorização superficial e gera lacunas no aprendizado, dificultando a compreensão das relações funcionais entre os processos celulares e suas funções mais complexas (REINKE; KYNN; PARKINSON, 2021).

Tais dificuldades são comuns aos alunos com visão típica, mas se aprofundam quando se trata de estudantes com deficiência visual. O número de alunos com deficiência visual matriculados em instituições de Ensino Superior vem aumentando nos últimos anos (INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA, 2011, 2021, 2022), fato que é atribuído a políticas inclusivas de âmbito estadual e nacional (BRASIL, 2015; MINAS GERAIS, 2013). Apesar desse incremento no ingresso de estudantes com deficiências, sua permanência nas instituições de ensino é muitas vezes comprometida pela escassez de abordagens metodológicas que favoreçam sua aprendizagem e integração com os colegas (TRACY *et al.*, 2022).

Para favorecer a aprendizagem de Biologia Celular para todos os estudantes, é pertinente que os estudos sejam focados em proposições concretas, com a utilização de recursos inclusivos, acessíveis e inovadores. Em um estudo anterior alinhado a estes princípios, nosso grupo demonstrou que abordagens multissensoriais, as quais combinam estímulos táteis, auditivos e visuais, favorecem a aprendizagem de estudantes com deficiência visual, permitindo a assimilação de características morfológicas e funcionais das células e seus componentes e promovendo maior engajamento e participação ativa nas aulas (GONÇALVES *et al.*, 2025). Além disso, investigamos o potencial da modelagem tridimensional (3D) aplicada às realidades virtual (RV) e aumentada (RA) acompanhadas de audiodescrições e funcionalidades de alteração de cores para o ensino de membranas celulares, e verificamos que essas tecnologias oferecem ambientes interativos de aprendizagem. A avaliação dessas ferramentas por estudantes com visão típica e com deficiência visual e professores de Biologia Celular indicou percepções positivas em relação à usabilidade e eficácia na aprendizagem, ressaltando a

importância das Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação (TDICs) na construção de práticas educacionais mais inclusivas (PANZERA-GONÇALVES; OLIVEIRA, 2025).

As TDICs correspondem às ferramentas que convergem para compor novas tecnologias, como vídeos, softwares, aplicativos, imagens, consoles e jogos virtuais que, por meio de conexão com a internet, ampliam as possibilidades de comunicação (SIQUEIRA *et al.*, 2020; VALENTE, 2013). Nesse sentido, a rede mundial de computadores surge como uma poderosa ferramenta para facilitar e enriquecer o processo de aprendizagem de Biologia Celular (MCGREAL, 1997). Ao proporcionar acesso a uma infinidade de recursos educacionais online, como vídeos e simulações, a internet permite que os estudantes explorem conteúdos de forma flexível e no seu próprio ritmo (AKPEN *et al.*, 2024).

Para que esses recursos digitais sejam de fato acessíveis a todos os estudantes, incluindo aqueles com deficiência, é necessário garantir a equidade no acesso à informação. Para tanto, o Consórcio World Wide Web (W3C) desenvolveu as Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo da Web (WCAG, sigla em inglês para Web Content Accessibility Guidelines), as quais abrangem recomendações para tornar sites da internet acessíveis para pessoas com cegueira, baixa visão, fotossensibilidade, surdez, baixa audição, limitação de movimentação ou fala, além de acomodações para pessoas com dificuldade de aprendizagem ou limitações cognitivas. As WCAG são organizadas em quatro camadas de orientação. A primeira refere aos quatro princípios que estabelecem a base da acessibilidade digital: o conteúdo de um site da internet deve ser perceptível, garantindo que os usuários consigam perceber a informação e os elementos da interface; operável, permitindo que todos possam interagir com os componentes sem barreiras; compreensível, assegurando que a informação e a operação do site sejam fáceis de entender; e robusto, garantindo compatibilidade com tecnologias assistivas e diferentes navegadores. A segunda camada consiste nas diretrizes que detalham como alcançar cada princípio, fornecendo boas práticas para tornar o conteúdo acessível. A terceira camada é composta pelos critérios de sucesso, que são requisitos testáveis organizados em três níveis de conformidade: A (mínimo), AA (intermediário) e AAA (mais rigoroso). Enquanto o nível de conformidade A estabelece critérios mais básicos de acessibilidade, garantindo que o conteúdo do site seja considerado acessível para a maioria das pessoas com deficiências, ainda que possam existir limitações de acesso e navegação para pessoas com deficiências mais severas; o nível de conformidade AA define critérios adicionais que aprimoram a acessibilidade e garantem que o conteúdo seja acessível para um número maior de pessoas com diferentes tipos de deficiências. Este nível é geralmente recomendado para a maior parte do conteúdo da internet, pois abrange um amplo espectro de requisitos de acessibilidade. Por fim, o nível AAA

estabelece os níveis mais rigorosos de acessibilidade. Ao atender a esses critérios, o conteúdo é considerado altamente acessível para a maioria das pessoas com deficiências. No entanto, cumprir todos os critérios de nível AAA pode ser desafiador, pois envolve requisitos mais complexos e detalhados. Para ser certificado em cada um dos níveis de conformidade, um site precisa cumprir todos os critérios de sucesso relacionados ao nível de conformidade em questão. Por fim, a quarta camada apresenta as técnicas sugeridas, que incluem métodos específicos para atender aos critérios de sucesso, abordando tanto práticas recomendadas quanto falhas comuns. Essa estrutura hierárquica permite que desenvolvedores e designers criem experiências mais inclusivas para diferentes públicos (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2018).

Obviamente, a promoção da inclusão digital vai além da implementação de parâmetros de acessibilidade em sites da internet. Trata-se também de explorar recursos que potencializem a experiência de aprendizagem de todos os estudantes (AHUJA, 2023; DEMUNER *et al.*, 2023). Nesse contexto, a integração da internet com outras tecnologias, como a modelagem 3D, amplia as possibilidades educacionais, permitindo experiências imersivas e interativas. Especialmente quando combinada a essas inovações, a rede mundial de computadores possibilita a visualização de estruturas celulares complexas e a simulação de processos biológicos, seja por meio de RV, seja por meio de RA.

A RV é capaz de transportar os alunos para ambientes virtuais onde podem experimentar conceitos de forma aprofundada e manipular células através de um mouse, teclado ou tela sensível ao toque (BENNETT; SAUNDERS, 2019; CIPRESSO *et al.*, 2018). Já na RA, as experiências são agregadas ao espaço físico (KIRNER; KIRNER, 2011). Em um dispositivo com software de RA instalado e dotado de câmera (tal qual smartphones e tablets), o usuário pode interagir com modelos 3D sobrepostos a cenários reais (AZUMA *et al.*, 2001; TURHAN; GÜMÜŞ, 2022). Tanto a RV quanto a RA consistem em tecnologias atrativas e, apesar de sua popularização, ainda são subutilizadas nas práticas pedagógicas de instituições de ensino superior, seja pela falta de conhecimento técnico, que dificulta o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem tecnológicas e acessíveis (YOOYATIVONG, 2018); seja pela dificuldade de implementação decorrente da escassez de financiamento ou equipamentos de qualidade (ATABEK, 2019). De modo a solucionar esta problemática, é possível lançar mão de princípios da pesquisa em design educacional (PDE) para desenvolver ferramentas de aprendizagem que sejam ao mesmo tempo inovadoras, acessíveis e adaptadas às necessidades dos alunos e professores, promovendo um ambiente de ensino mais dinâmico e interativo.

A PDE é estruturada em três etapas: pesquisa preliminar, prototipagem e validação. Na primeira, desenvolve-se o arcabouço teórico que norteará o desenvolvimento das ferramentas

de aprendizagem. A prototipagem, por sua vez, ocorre em ciclos de pesquisa, com cada iteração oferecendo reflexões que buscam aprimorar as ferramentas em desenvolvimento. Finalmente, a validação verifica se as ferramentas atendem às especificações preestabelecidas, podendo gerar recomendações que exigem novos ciclos de redesenho para aprimorar a eficácia dos materiais de aprendizagem (MCKENNEY; REEVES, 2012; PLOMP; NIEVEEN, 2010).

Considerando o potencial da internet para criar oportunidades de aprendizagem inclusivas e a escassez de ferramentas de ensino adaptadas às necessidades de todos os estudantes, o presente estudo objetivou criar e validar um site inclusivo para ensino de Biologia Celular, dotado de ambientes de RV e RA, cujo conteúdo inclui representações 3D de organelas, estruturas e processos celulares complexos. Estes ambientes foram desenvolvidos a partir de princípios da PDE e contam com parâmetros de acessibilidade, com intuito de garantir que todos os estudantes, independentemente de suas necessidades específicas, possam interagir, compreender e aprender de forma eficaz conceitos básicos e avançados de Biologia Celular. Considerando ainda que a aquisição de conhecimento técnico capacita profissionais da educação para o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem tecnológicas (RAHIM, 2021), este estudo também pretende servir como um manual de instrução abrangente que facilita a reprodutibilidade de técnicas para a criação de ferramentas de aprendizagem baseadas na rede mundial de computadores, em RV e em RA.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em dois grandes momentos. O primeiro compreendeu o desenvolvimento das ferramentas de aprendizagem e foi seguido pelo momento de validação. O desenvolvimento das ferramentas baseou-se nos princípios da PDE, os quais preconizam ciclos contínuos de design, implementação, análise e redesign (PLOMP; NIEVEEN, 2010; VAN DEN AKKER *et al.*, 2006). Este momento foi sistematizado nas seguintes etapas: (i) desenvolvimento dos modelos 3D e dos ambientes de RV; (ii) desenvolvimento dos ambientes de RA; e (iii) desenvolvimento do site e implementação de parâmetros de acessibilidade.

Quanto à validação das ferramentas de aprendizagem, por ser tratar de um estudo quase-experimental descritivo e qualitativo, esta pesquisa não apresentou distribuição aleatória de participantes, mas incluiu alunos com deficiência visual e com visão típica, além de professores de Biologia Celular. Apesar dessa distribuição não aleatória, os eventos foram controlados durante o estudo e as ocorrências observadas foram utilizadas para desenvolver coletas de dados

de acordo com o planejamento (SOUZA E SILVA; DA CUNHA LIMA FREIRE; CERQUEIRA, 2024).

2.1. Desenvolvimento dos modelos 3D e dos ambientes de RV

Os procedimentos de confecção dos modelos 3D e dos ambientes de RV foram adaptados de metodologias previamente desenvolvidas por nosso grupo de trabalho para produção de ferramentas de aprendizagem de membranas celulares (PANZERA-GONÇALVES; OLIVEIRA, 2025). A modelagem 3D de organelas, estruturas e processos celulares foi realizada no Nomad Sculpt (HEXANOMAD, 2024), aplicativo que permite a criação de modelos 3D em dispositivos portáteis com auxílio de uma caneta stylus. O processo foi baseado em descrições e esquemas ilustrativos provenientes de livros didáticos e artigos científicos de Biologia Celular, com intuito de garantir que o design dos modelos fosse cientificamente preciso. Após modelagem no Nomad Sculpt, os modelos 3D foram aprimorados no Blender (BLENDER FOUNDATION, 2024), software que possibilita a atribuição de propriedades visuais aos modelos (cor, textura, transparência, opacidade, brilho, entre outras). Este programa também foi utilizado para criação de animações em modelos 3D específicos que retratavam processos celulares.

O desenvolvimento dos ambientes de RV teve início após a conclusão da modelagem e envolveu a criação de páginas da web no formato .html, que incluíram os modelos 3D e foram dotadas de parâmetros de acessibilidade (interface de alteração de cores e audiodescrições). Para tanto, os modelos 3D foram previamente enviados com uma conta gratuita para os servidores do Sketchfab (<https://sketchfab.com/>), e as estruturas representadas receberam rótulos de identificação.

2.2. Desenvolvimento dos ambientes de RA

Após a finalização dos ambientes de RV, os modelos 3D selecionados foram otimizados e convertidos para os formatos .glb e .usdc no software Blender, para serem então incorporados em ambientes de RA. Os arquivos .usdc foram manualmente renomeados para .usdz, formato que corresponde à versão compactada dos arquivos .usdc (KADYROV, 2021). Como a tecnologia de RA requer dispositivos com câmera para funcionar corretamente, a escolha desses formatos considerou os dois principais sistemas operacionais utilizados em dispositivos móveis: Android e iOS (GARG; BALIYAN, 2021; GÖTZ; STIEGER; REIPS, 2017). Enquanto o formato .glb é compatível com dispositivos Android (MATHUR; BROZOVICH; RAUSCH,

2023), o formato .usdz foi desenvolvido especificamente para aplicações de RA em dispositivos iOS (AFSHARIPOUR; MAGHOUL, 2024). A adoção desses formatos assegurou acessibilidade e eficiência na visualização dos modelos 3D em diferentes dispositivos. Finalizada a otimização dos modelos 3D, os mesmos foram hospedados no serviço de armazenamento na nuvem do Firebase (GOOGLE, 2024a). Os ambientes de RA foram elaborados a partir da interface de programação de aplicações do <model-viewer>, um componente que permite a visualização de modelos 3D em páginas da web e que também é compatível com os formatos .glb e .usdz (GOOGLE, 2024c).

2.3. Desenvolvimento do site e implementação de parâmetros de acessibilidade

Diante da grande quantidade de modelos 3D desenvolvidos e da necessidade de reunir os ambientes de RV e RA em apenas um local de fácil acesso, foi desenvolvido um site da internet. O site foi criado com auxílio do Bootstrap Studio, aplicativo capaz de criar sites responsivos e personalizáveis (ZINE EOOD, 2024), e hospedado na plataforma gratuita Firebase (GOOGLE, 2024b).

Considerando que um dos principais objetivos deste estudo foi promover a inclusão de estudantes com deficiência visual nas aulas de Biologia Celular, um dos compromissos firmados durante o desenvolvimento do site foi dotá-lo de parâmetros que facilitassem tanto seu acesso quanto o uso de suas ferramentas de aprendizagem. Para tanto, foram adotadas as Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo da Web (WCAG 2.1).

2.4. Aplicação, avaliação, coleta e análise de dados

As ferramentas de aprendizagem do site foram aplicadas durante aulas de Biologia Celular para alunos com visão típica matriculados em cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Inicialmente, os estudantes receberam um breve treinamento operacional para familiarizá-los com as ferramentas. Em seguida, foi permitida a visita ao site mediante leitura de QR Codes ou através de acesso as URLs em seus notebooks ou smartphones. Neste momento, tanto os ambientes de RV quanto os de RA puderam ser explorados livremente.

Alunos com diferentes deficiências visuais matriculados em cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas da UFMG também participaram da avaliação das ferramentas de aprendizagem. Como o objetivo foi promover a autonomia de todos os alunos, o treinamento operacional foi prolongado para este grupo até que eles compreendessem plenamente os

recursos e pudessem utilizá-los de forma independente. Após o treinamento a aplicação das ferramentas transcorreu de forma semelhante à dos alunos com visão típica.

Com intuito de aferir as impressões de profissionais da educação para com as ferramentas, e assim obter informações que pudessem auxiliar em seu aperfeiçoamento, recrutamos professores de Biologia Celular experientes e em início de carreira de diversos cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas da UFMG para também colaborar no processo de avaliação.

Os procedimentos de validação das ferramentas foram baseados em metodologias previamente utilizadas por nosso grupo de trabalho e envolveram a análise de dados coletados em questionários eletrônicos estruturados com a escala Likert de 5 pontos (PANZERA-GONÇALVES; OLIVEIRA, 2025). Esta escala compreende um método amplamente empregado para medir atitudes, opiniões e percepções, permitindo que os participantes expressem seu grau de concordância ou discordância em relação a uma série de afirmações ou indicadores (LIKERT, 1932). Nesta pesquisa, procuramos medir as atitudes dos participantes (estudantes com visão típica, estudantes com deficiência, professores experientes e professores em início de carreira) para com cada um dos elementos constituintes das ferramentas de aprendizagem (ambientes de RV e de RA, as audiodescrições, os textos explicativos, os modelos 3D e a interface de alteração de cores) e para com a experiência geral oferecida pelo site. Estas atitudes correspondem a construtos, ou seja, variáveis latentes que não podem ser observadas diretamente (MATTHIENSEN, 2011). A escala de Likert permite quantificar estes conceitos abstratos mediante conversão da concordância qualitativa dos indicadores de cada construto em uma métrica numérica analisável (HAIR *et al.*, 2005). Considerando que os participantes forneceram seus graus de concordância com afirmações sobre satisfação, qualidade visual, facilidade de uso, qualidade do conteúdo, confiabilidade, eficácia e adequação das ferramentas, convertemos as respostas em escores atribuídos de acordo com o grau de concordância com estes indicadores (do mais baixo para o mais alto: discordo totalmente = 1, discordo = 2, neutro = 3, concordo = 4 e concordo totalmente = 5) (MONTEIRO, 2021) no Excel (MICROSOFT, 2024b). Com intuito de aferir quantitativamente a força e a direção das respostas dos participantes em relação aos construtos, calculamos as médias de concordância e os desvios-padrão (DP) para cada um dos indicadores. Estas médias foram posteriormente utilizadas para calcular a média geral de concordância de cada um dos constructos.

Finalmente, calculamos o Alfa de Cronbach no IBM SPSS Statistics (IBM, 2024), instrumento capaz de medir a confiabilidade das respostas dos participantes a partir da análise da consistência interna dos indicadores (HAIR *et al.*, 2005). Os valores de alfa variam de 0 a

1,0, com valores mais altos indicando maior consistência interna, a saber: valores superiores a 0,80 indicam consistência quase perfeita; valores entre 0,61 e 0,80 denotam consistência substancial; grandezas entre 0,41 e 0,60 refletem consistência moderada; grandezas entre 0,21 e 0,40 indicam consistência razoável e valores abaixo de 0,21 mostram consistência pequena (LANDIS; KOCH, 1977).

Além dos dados referentes às atitudes, foram também coletados dados descritivos dos participantes (idade, gênero e tempo de atuação na docência de Biologia Celular). Na seção de resultados estes e outros dados são apresentados como números absolutos, percentuais, médias e desvios-padrão.

3. RESULTADOS

3.1. Desenvolvimento do site

A etapa de modelagem resultou na produção de 82 modelos 3D, incluindo: modelos estáticos e animados representativos de organelas celulares (núcleo, centríolo, centrossomo, mitocôndria, ribossomo, retículo endoplasmático liso e rugoso, ribossomo, complexo de Golgi, lisossomo, endossomo, peroxissomo e proteassomo), estruturas celulares (membrana plasmática e endomembranas, filamentos do citoesqueleto, citoplasma e cromossomos) e processos celulares (compactação do DNA, interfase, mitose e meiose).

Utilizando a interface de programação de aplicações do Sketchfab (SKETCHFAB, 2024) e codificação nas linguagens HTML, CSS e JavaScript, estes modelos foram incorporados em páginas da web no formato .html. De modo a fornecer uma breve explicação sobre os eventos representados, cada modelo 3D recebeu textos explicativos desenvolvidos mediante consulta de livros de referência em Biologia Celular e artigos científicos. Parâmetros de acessibilidade também foram desenvolvidos para facilitar a interação com os modelos 3D (audiodescrições e interface de alteração de cores). Juntos, cada modelo 3D, seus textos explicativos, audiodescrições e interface de alteração de cores constituíram um ambiente de RV.

Após otimização para utilização com tecnologia RA e incorporação no <model-viewer>, os modelos 3D foram hospedados no serviço de hospedagem na nuvem do Firebase, gerando um endereço na internet. Tendo em vista que a tecnologia de RA foi planejada para ser utilizada em dispositivos portáteis dotados de câmera, como smartphones e tablets (KAR; GHOSH; ROUT, 2021), de modo a facilitar o acesso a estes recursos, suas URLs foram convertidas em QR Codes por meio da ferramenta gratuita Fast QR Code Maker (TWEAKNOW SOFTWARE,

2024). Cada modelo 3D otimizado recebeu um QR Code específico que redireciona para uma página da web. Cada uma dessas páginas da web compreende um ambiente de RA.

As páginas da web dos ambientes de RV e RA compreenderam a base para desenvolvimento do site. De modo a permitir o acesso livre e sistemático pelos usuários, foi criada uma página inicial dotada de duas seções (Seção de Realidade Virtual e Seção de Realidade Aumentada) com links que redirecionam para os ambientes de RV e RA desenvolvidos. Esta página inicial também foi enriquecida com uma mensagem de boas-vindas para os usuários e instruções básicas de acesso ao conteúdo do site por meio de atalhos de teclado.

Uma das etapas mais importantes do desenvolvimento de um site é a escolha de seu nome, cujos princípios se relacionam com sua finalidade, temas associados, posicionamento no mercado e estratégias de marketing que serão utilizadas para promovê-lo (SHIPLEY; HOOKY; WALLACE, 1988). O nome de nosso site, portanto, deveria relacioná-lo rapidamente com a proposta para o qual foi desenvolvido: reunir ferramentas de ensino e aprendizagem de Biologia Celular. O autor uniu então as palavras “citologia” e “ensino” para criar o conceito “Citossina”. Esta fusão de termos, assemelha-se com “citocina”, palavra que denomina proteínas liberadas por células e que participam de seus mecanismos de comunicação e interação (ZHANG; AN, 2007). A semelhança do conceito criado com um termo biológico tão importante, revelou-se como escolha de nome ideal e foi adotada. Dessa forma, o site pode ser acessado através do endereço <https://citossina.web.app/>.

3.2. Implementação de parâmetros de acessibilidade

De modo a tornar tanto a navegação pelo site quanto a utilização dos modelos 3D satisfatória para estudantes com deficiência visual, observamos os critérios de sucesso das WCAG 2.1 e implementamos parâmetros de acessibilidade na plataforma. Em um cenário ideal, um site deve se adequar para cumprir todos os critérios de sucesso e, consequentemente, todas as diretrizes de conformidade do nível AA das WCAG. Não é recomendado que o nível AAA seja exigido como uma política geral para sites inteiros, já que não é possível cumprir todos os critérios de sucesso deste nível para alguns conteúdos (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2024b). Durante a construção do nosso site, procuramos cumprir o maior número de critérios de sucesso possível. Mediante os critérios cumpridos, foi possível obter o nível AA de conformidade com as WCAG 2.1, o que pode ser comprovado por meio de uma declaração de

acessibilidade emitida diretamente do site do Consórcio World Wide Web (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2021).

Dentre os parâmetros de acessibilidade incluídos no site estão: (i) facilitação de visualização do site por meio de esquema acessível de cores e contraste; (ii) layout ajustável em telas de diferentes tamanhos; (iii) apresentação do conteúdo textual do site de forma adaptada; (iv) imagens com dicas de contexto e textos alternativos; e (v) desenvolvimento de audiodescrições e (iv) de interface de alteração de cores para os modelos 3D.

3.2.1. Facilitação de visualização do site por meio de esquema acessível de cores e contraste

A cor desempenha um papel crucial na criação de experiências visuais acessíveis. Este elemento pode afetar diretamente a legibilidade, a compreensão de textos exibidos em telas, especialmente para pessoas com deficiência visual ou dificuldades de leitura (REQUE; BUENO; LIMA, 2022). Devido à grande diversidade de níveis de percepção de cores e de intensidade luminosa apresentadas por pessoas com deficiência visual, ao criar um site, é importante planejar experiências que sejam acessíveis para o maior número de condições. O contraste, por sua vez, compreende um importante elemento de interação com o mundo para pessoas com baixa visão (DALKE *et al.*, 2010). É fundamental, portanto, garantir um contraste adequado entre o texto, os elementos interativos e o plano de fundo de um site. Por tais motivos, o site que desenvolvemos apresenta dois modos globais de cores, um claro e um escuro, os quais podem ser alternados de acordo com a preferência do usuário. No modo claro, que corresponde à forma mais tradicional de exibição de sites da internet (ERICKSON *et al.*, 2021), as cores claras aplicadas ao plano de fundo intencionam contrastar com o conteúdo textual em cor escura, fornecendo um contraste mínimo de 4.5:1 (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2018). Já no modo escuro, o conteúdo textual é apresentado em cor clara, enquanto os planos de fundo são exibidos em tons escuros, ainda com intuito de garantir o contraste mínimo de 4.5:1, mas também para trazer maior conforto visual àqueles afetados pela luminosidade emitida por telas (ERICKSON *et al.*, 2020). Tanto no modo claro quanto no modo escuro, links e botões são apresentados em cores que contrastam com outros conteúdos textuais e com o plano de fundo (Figura 1).

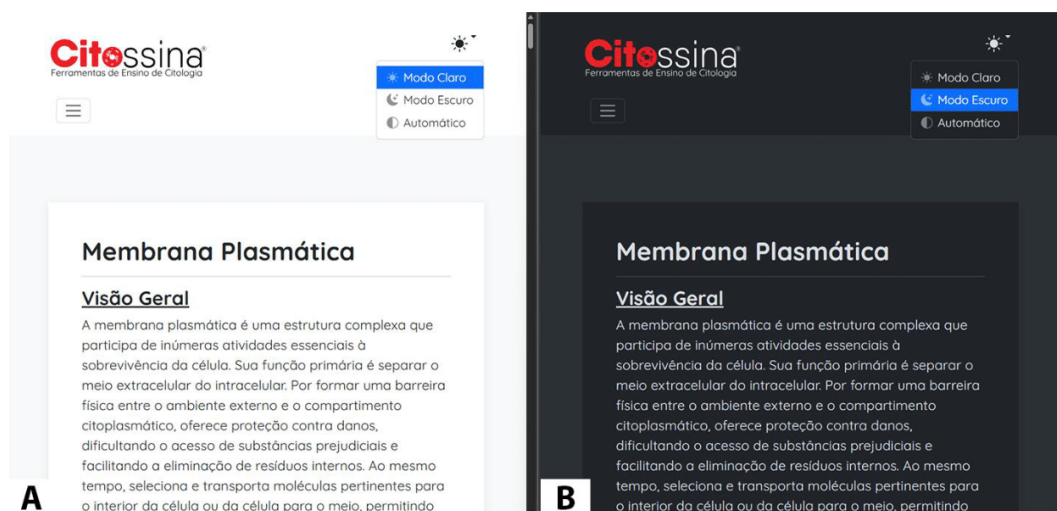


Figura 1: Print de tela mostrando os esquemas de cores disponíveis no modo claro (A) e no modo escuro (B) do site. Em ambos os modos intenciona-se promover o contraste adequado entre o plano de fundo, o conteúdo textual e outros elementos do layout.

O Quadro 1 descreve os esquemas de cores utilizados em cada elemento do site nos modos claro e escuro. São detalhados também os códigos hexadecimais de cada cor. O sistema hexadecimal de cores é amplamente utilizado no desenvolvimento de sites da internet e indica as proporções de vermelho, verde e azul que compõem uma cor específica (RHYNE, 2012).

Quadro 1 – Esquemas de cores disponíveis nos modos claro e escuro para os elementos do site e seus respectivos códigos hexadecimais.

Elemento	Modo Claro		Modo Escuro	
	Cor	Código Hexadecimal	Cor	Código Hexadecimal
Plano de fundo do cabeçalho	branco puro (white)	#ffffff	metal escuro (dark gunmetal)	#212529
Plano de fundo do rodapé	branco puro (white)	#ffffff	metal escuro (dark gunmetal)	#212529
Plano de fundo do corpo	Branco fantasma (ghost white)	#f8f9fa	metal (gunmetal)	#2b3035
Plano de fundo do conteúdo textual	branco puro (white)	#ffffff	metal escuro (dark gunmetal)	#212529
Conteúdo textual (títulos, subtítulos, parágrafos e legendas)	metal escuro (dark gunmetal)	#212529	cinza médio (gainsboro)	#dbdfe3
Texto selecionado com ponteiro do mouse	azul celta (celtic blue)	#3367d1	azul celta (celtic blue)	#3367d1

Títulos da página inicial	Azul médio escuro (tufts blue)	#3b99e0	Azul médio escuro (tufts blue)	#3b99e0
Links	azul brandeis (brandeis blue)	#0d6efd	Azul safira (saphire)	#0a58ca
Links selecionados	Céu azul francês (french sky blue)	#6ea8fe	azul jordy (jordy blue)	#8bb9fe
Plano de fundo de botões	azul brandeis (brandeis blue)	#0d6efd	azul brandeis (brandeis blue)	#0d6efd
Texto de botões	branco puro (white)	#ffffff	branco puro (white)	#ffffff
Bordas	Platina (platinum)	#dee2e6	Davy's grey (cinza de Davy)	#495057

3.2.2. Layout ajustável em telas de diferentes tamanhos

É sabido que pessoas com deficiência visual, como aquelas com baixa visão ou cegueira, muitas vezes dependem de ampliação para acessar conteúdo na internet (BEIER *et al.*, 2021; HAMIDEH KERDAR; BÄCHLER; KIRCHHOFF, 2024). Dessa forma, a correta exibição do conteúdo textual, de imagens e de outros elementos de um site é crucial para garantir a acessibilidade dessas pessoas. Com intuito de tornar o site responsivo, ou seja, que seu conteúdo seja corretamente ampliado ou reduzido em telas de diferentes tamanhos (como as de dispositivos móveis), aplicamos conceitos de design responsivo, uma técnica introduzida em 2010 que confere a um site a capacidade de se adaptar a diferentes resoluções e dispositivos nos quais é exibido (GIURGIU; GLIGOREA, 2017). Esse processo foi viabilizado por meio da estilização em HTML e CSS, utilizando técnicas como media queries, layouts flexíveis com flexbox e grid, uso de unidades relativas (como em e rem) e fontes responsivas, as quais evitam que os itens exibidos em tela fiquem sobrepostos, embaralhados ou desconfigurados. Além disso, ao ser visualizado nos navegadores Microsoft Edge, Google Chrome, Mozilla Firefox, é garantida a ampliação nativa do conteúdo textual do site em até 500%, sem a necessidade de instalação adicional de softwares de ampliação (GOOGLE, 2024d; MICROSOFT, 2024a; MOZILLA, 2024), tal qual evidenciado na Figura 2.

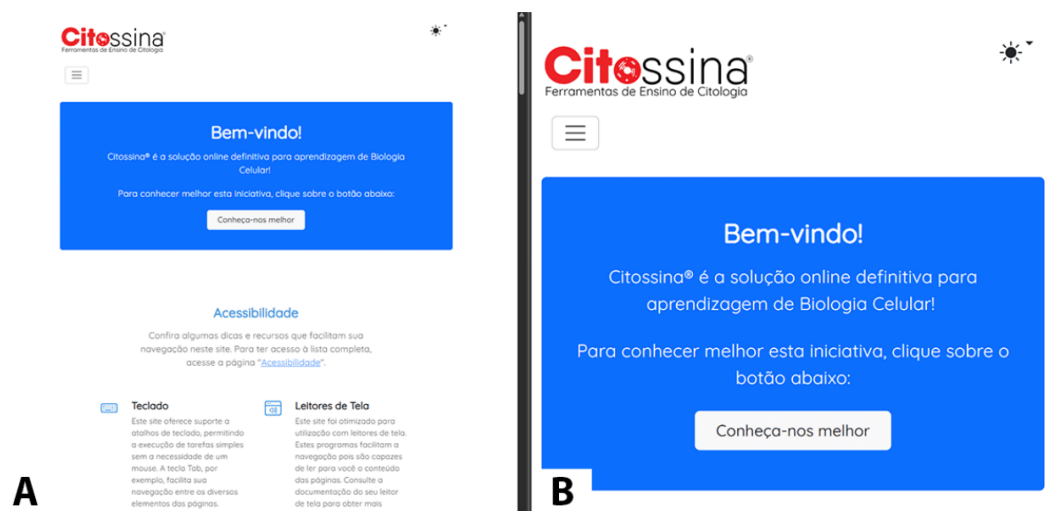


Figura 2: Print de tela mostrando o layout responsivo do site quando são aplicados os zooms de 100% (A) e de 250% (B). O reajuste no tamanho e na posição dos elementos permite que a orientação visual seja preservada, facilitando a navegação por pessoas com deficiências visuais. O mesmo princípio de design responsivo é automaticamente aplicado ao conteúdo do site, quando exibido em dispositivos móveis, como smartphones e tablets, os quais possuem telas menores.

3.2.3. Apresentação do conteúdo textual do site de forma adaptada

A apresentação visual do conteúdo textual compreende outro aspecto fundamental para garantir a acessibilidade de um site, pois influencia diretamente na legibilidade por diferentes públicos (BEIER *et al.*, 2021). Nesse sentido, é preciso assegurar que a distância entre os caracteres, as palavras e os parágrafos, geralmente medida em pixels (px), seja adequada para facilitar a leitura, evitando a fadiga visual e garantindo uma experiência mais confortável.

Com intuito de assegurar a legibilidade do conteúdo textual, tomamos diferentes medidas. Primeiramente, asseguramos que todo o conteúdo textual pudesse ser redimensionado sem tecnologia assistiva em até 200%, sem que ocorresse perda de funcionalidade; garantimos também que o alinhamento do texto explicativo fosse sempre à esquerda e não justificado, o que garante espaçamento homogêneo entre palavras e letras e, assim, facilita a leitura; padronizamos os tamanhos de fonte, alturas de linhas e espaçamentos entre letras que foram utilizados em diferentes tipos de conteúdo textual (títulos, subtítulos, parágrafos, entre outros), conforme descrito no Quadro 2; e definimos o espaçamento entre as linhas como 1.75 pixels e o espaçamento entre os parágrafos igual ou superior a 1.75. Estas medidas garantem que o texto não se sobreponha quando lido por pessoas com certas condições visuais (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2018).

Quadro 2 – Tamanhos de fonte, alturas de linhas e espaçamentos entre letras aplicados nos diferentes tipos de conteúdo textual. Os valores são expressos em pixels (px).

Elemento	Tamanho da Fonte	Altura da Linha	Espaçamento entre Letras
Títulos Principais (títulos de nível 1)	30px	36px	0.12px
Subtítulos Primários (títulos de nível 2)	23px	36px	0.12px
Subtítulos Secundários (títulos de nível 3)	18px	30px	0.12px
Itens do Menu Principal	14px	21px	0.12px
Parágrafos (blocos de texto)	16px	24px	0.12px
Notas de Rodapé	12px	18px	0.12px

Finalmente, a fonte utilizada em todos os elementos textuais do site é “Quicksand”. Por não possuir serifa, esta fonte garante a legibilidade do texto mesmo quando usada em pequenos tamanhos (GOOGLE FONTS, 2024), além de transmitir modernidade, clareza e minimalismo (DOGUSOY; CICEK; CAGILTAY, 2016; TINKOV, 2024).

3.2.4. Imagens com dicas de contexto e textos alternativos

Imagens são utilizadas em sites com diferentes finalidades. Em primeiro lugar, podem compreender elementos decorativos, transmitindo emoções que aumentam o envolvimento do usuário (MAKRYDAKIS, 2024). Quando aplicadas na construção de logotipos e ícones, podem ajudar na identificação de um produto ou de uma marca (LOWRY; WILSON; HAIG, 2014). Além disso, podem ter caráter informativo quando usadas para complementar o conteúdo textual e transmitir informações e conceitos aos usuários, como gráficos, diagramas e ilustrações. Por fim, podem ser utilizadas como elementos de navegação que auxiliam os usuários a interagirem com o site, como botões ou ícones (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 2024a).

Tendo em vista que pessoas completamente cegas não são capazes de visualizar imagens, a utilização inadequada desses elementos pode dificultar a navegação por sites, principalmente quando estes elementos não são descritos corretamente ou quando são dotados de animações que alteram sua posição em tela (ABDELAAL; AL-THANI, 2025). Para aumentar a acessibilidade para pessoas com diferentes níveis de deficiência visual, é possível incorporar diferentes recursos que facilitam a navegação com tecnologias assistivas e/ou sem uso de mouse. Em nosso site, as imagens funcionais, como logotipos que possuem links, receberam

texto alternativo (alt text), atributo usado para fornecer uma descrição textual do conteúdo das imagens (HUNTSMAN, 2022). Motores de busca ou recursos de acessibilidade não são capazes de ver imagens ou vídeos. O texto alternativo, portanto, fornece informação textual a respeito do conteúdo de tais imagens ou vídeos (MOTT; TANG; CUTRELL, 2023).

Além de textos alternativos, imagens funcionais também receberam dicas de contexto ou tooltips. Essa funcionalidade fornece informações adicionais quando o cursor do mouse é posicionado sobre um elemento específico do site. Essas dicas de contexto podem ser úteis para descrever elementos interativos, como botões ou ícones e para fornecer orientações claras sobre o propósito desses elementos (ADAMS; TUCKER; VENTER, 2017).

3.2.5. Desenvolvimento de audiodescrições para os modelos 3D

Com intuito de tornar os modelos 3D acessíveis e inteligíveis para estudantes cegos, desenvolvemos audiodescrições para cada um deles. Audiodescrição é uma técnica que fornece descrições verbais de elementos visuais que não poderiam ser percebidos ou compreendidos por pessoas com deficiência visual (BRASIL, 2006). Considerando a complexidade estrutural dos modelos 3D que desenvolvemos padronizamos um protocolo para criação de audiodescrições. A descrição dos objetos que compõem os modelos seguiu sua organização espacial, de modo que as estruturas próximas foram descritas sequencialmente. Primeiramente foram descritas as estruturas em primeiro plano e depois aquelas em planos secundários, sempre da esquerda para a direita e de cima para baixo. Quando necessário, a posição de uma estrutura foi utilizada como referência para a descrição espacial da seguinte. Para descrever a morfologia dos objetos, foram utilizadas formas familiares (por exemplo, a cabeça do fosfolípídeo saturado foi descrita como esférica, enquanto as caudas foram descritas como alongadas, retas e paralelas entre si). Para os modelos equipados com animações, os acontecimentos retratados foram narrados em ordem cronológica. O desenvolvimento deste protocolo contou com a colaboração de técnicos do Núcleo de Acessibilidade e Inclusão (NAI), centro de referência no apoio a membros da comunidade da UFMG com deficiência física, sensorial ou intelectual e necessidades educacionais especiais (NAI, 2022 - <https://www.ufmg.br/nai/>).

Em nosso site as audiodescrições de cada modelo 3D foram apresentadas de duas formas: uma escrita e uma falada (Figura 3). A versão escrita compreende o texto integral da audiodescrição, que pode ser lido por softwares leitores de tela, como o NVDA (NV ACCESS, 2024). A versão em áudio corresponde à narração da versão escrita, desenvolvida com auxílio do “Free Text to Speech Online Converter Tools”, uma ferramenta capaz de converter textos em voz com entonação humana realista gerada por inteligência artificial (TEXT-TO-SPEECH-

ONLINE, 2024). Esta última versão pode ser reproduzida através de um painel de controle com botões de pausa e volume e dispensa instalação de software leitor de tela.

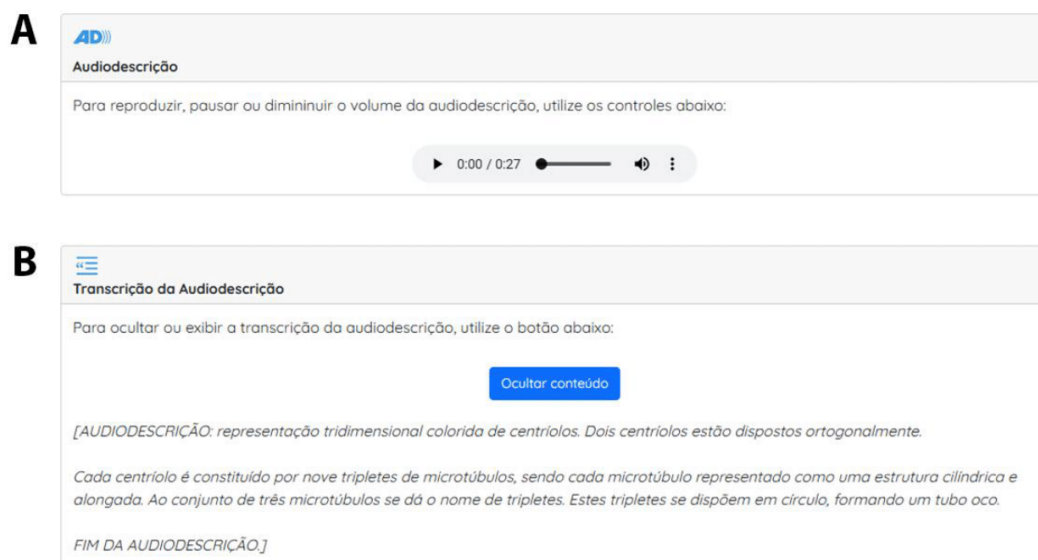


Figura 3: Print de tela mostrando as duas formas de apresentação das audiodescrições dos modelos 3D no site. Em **A** está a versão falada da audiodescrição, cuja reprodução é controlada por um painel de controle. Em **B** está versão em texto, que pode ser lida por softwares leitores de tela.

3.2.6. Implementação de interface de alteração de cores dos modelos 3D

Com intuito de tornar os modelos 3D acessíveis e inteligíveis para estudantes com baixa visão, cegueira de cores ou outras condições que dificultem a percepção de cores (daltonismo, entre outras), desenvolvemos uma interface que permite aos usuários alterar livremente a cor dos objetos representados (Figura 4). Para tanto, adicionamos linhas de comando da interface de programação de aplicações do Sketchfab ao código fonte da página web através do Visual Studio Code (MICROSOFT, 2024c). Como resultado, para cada objeto incluído em cada modelo 3D é possível alternar entre cores primárias (vermelho, amarelo e azul), cores secundárias (roxo, verde, rosa e laranja) e cores neutras (preto, cinza e branco). A multiplicidade de combinações de cores que podem ser aplicadas pode ajudar os usuários afetados por problemas de percepção de cores a superar dificuldades de visualização. O contraste, por sua vez, pode ajudar indivíduos com baixa acuidade visual a visualizar estruturas específicas.

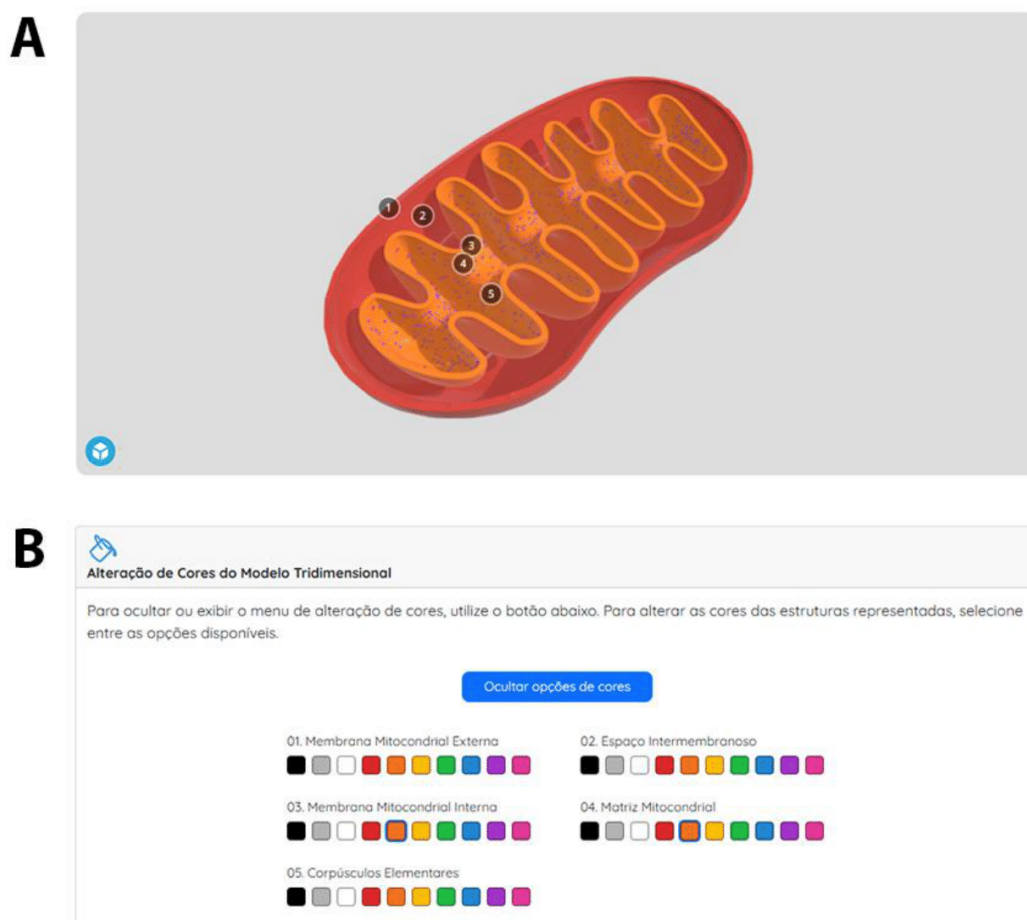


Figura 4: Print de tela mostrando a interface de alteração de cores (**B**), que permite ao usuário modificar a apresentação visual de cada um dos objetos incluídos em um modelo 3D (**A**). Esta funcionalidade facilita a visualização dos objetos por pessoas com condições que dificultam a visualização de cores específicas ou com cegueira de cores.

3.3. Aplicação e validação das ferramentas de ensino-aprendizagem desenvolvidas

273 alunos com visão típica matriculados em dez diferentes cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas (Aquacultura, Biomedicina, Ciências Biológicas, Educação Física, Farmácia, Enfermagem, Medicina, Medicina Veterinária, Nutrição e Terapia Ocupacional) da UFMG participaram da avaliação das ferramentas. Conforme descrito na Tabela 1, 174 estudantes (64%) eram do sexo feminino, enquanto 99 estudantes (36%) eram do sexo masculino. A idade média foi similar entre participantes do sexo feminino (20,6) e do sexo masculino (21,8). Participaram ainda 16 alunos com deficiência visual, incluindo estudantes com cegueira e com baixa visão, distribuídos em nove cursos de graduação (Aquacultura,

Biomedicina, Ciências Biológicas, Enfermagem, Farmácia, Fonoaudiologia, Medicina, Medicina Veterinária e Terapia Ocupacional). O grupo foi composto por 7 participantes do sexo masculino (44%) com idade média de 20,3 anos, e 9 participantes do sexo feminino (56%) com idade média de 20,7 anos.

Tabela 1: Idade e gênero dos estudantes com visão típica e com deficiência visual participantes deste estudo.

Estudantes com Visão Típica					Estudantes com Deficiência Visual				
Gênero			Idade		Gênero			Idade	
	N	Porcentagem	Média	DP		N	Porcentagem	Média	DP
Masculino	99	36	21.8	±5.7	Masculino	7	44	20.3	±2.2
Feminino	174	64	20.6	±2.9	Feminino	9	56	20.7	±2.4
Total do Grupo	273	100			Total do Grupo	16	100		

Como anteriormente mencionado, prolongamos o treinamento operacional para os alunos com deficiência visual, até que eles estivessem seguros para operar as ferramentas de aprendizagem independentemente. Após o treinamento, seguiu-se a etapa de aplicação, em que os participantes utilizaram as ferramentas individualmente, com intuito de reforçar as instruções recebidas. Esse procedimento foi muito importante, pois possibilitou que eles experenciassem as ferramentas nas condições específicas de seus smartphones, notebooks ou tablets, os quais possuem diferentes recursos e funcionalidades (tamanho de tela, sistema operacional e conectividade). Ao desenvolver as ferramentas procuramos oferecer o maior nível de imersão possível, já que procuramos assegurar que os recursos estivessem adaptados a dispositivos com diferentes tamanhos de tela, pudessem ser explorados tanto com auxílio de mouse quanto em telas sensíveis ao toque, além de serem compatíveis com diferentes navegadores da internet.

Com intuito de estabelecer um ambiente de aprendizagem colaborativa, nós também encorajamos o uso compartilhado das ferramentas. Observamos estudantes trabalhando em grupos, interagindo ativamente com as ferramentas enquanto compartilhavam dispositivos. Ao interagirem, trocaram experiências, ajudaram-se mutuamente a navegar nas ferramentas de aprendizagem e compartilharam os conhecimentos adquiridos, promovendo um ambiente de aprendizagem mútua.

Conforme demonstrado pelas médias gerais de concordância com os indicadores listados na Tabela 2, tanto estudantes com visão típica quanto estudantes com deficiência visual

expressaram atitudes positivas para com as ferramentas de aprendizagem. Entre os estudantes com visão típica os elementos com mais atitudes positivas foram os modelos 3D, os textos explicativos, os ambientes de RV e as audiodescrições (indicados respectivamente pelas médias gerais 4.85, 4.80 e 4.77). Já entre os estudantes com deficiência visual, as médias gerais apontam os textos explicativos, os modelos 3D e a interface de alteração de cores como os elementos com atitudes mais positivas (respectivamente 4.91, 4.84 e 4.81).

A respeito da experiência geral fornecida pelo site, novamente, ambos os grupos de estudantes demonstraram atitudes positivas. Para os estudantes com visão típica, as médias de concordância mais positivas são as dos indicadores:

“O conteúdo do site constitui uma fonte relevante de informação e contribuiu positivamente para a minha aprendizagem de Biologia Celular” (4.84),

“Acredito que posso utilizar as ferramentas didáticas do site como material de estudo suplementar aos que já utilizo, como slides e livros-texto” (4.81) e

“O uso das ferramentas de aprendizagem do site tornou o conteúdo de Biologia Celular mais acessível” (4.80).

Entre os estudantes com deficiência visual as médias de concordância mais positivas são as dos indicadores:

“O uso das ferramentas de aprendizagem do site tornou o conteúdo de Biologia Celular mais envolvente para mim” (4.88),

“O uso das ferramentas de aprendizagem do site tornou o conteúdo de Biologia Celular mais acessível”,

“O uso das ferramentas de aprendizagem do site me ajudou a entender conceitos básicos e avançados de Biologia Celular”,

“O uso das ferramentas de aprendizagem presentes no site me ajudou a recuperar defasagens em conceitos básicos e avançados de Biologia Celular” e

“Acredito que a utilização das ferramentas didáticas do site me estimulou a participar mais ativamente das aulas de Biologia Celular” (4.81).

Interessantemente, observamos baixos valores de desvios-padrão para todos os indicadores, além de valores do alfa de Cronbach superiores a 0.8 para todos os constructos, o

que indica respectivamente, uniformidade nos graus de concordância e confiabilidade nas respostas dos participantes de ambos os grupos (Tabela 2).

Tabela 2: Atitudes dos estudantes com visão típica e com deficiência visual para com as ferramentas de aprendizagem e para com o site.

Construto	Indicador	Estudantes com Visão Típica				Estudantes com Deficiência Visual			
		Média de Concordância ± DP	Média Geral	α de Cronbach		Média de Concordância ± DP	Média Geral	α de Cronbach	
Atitudes para com os ambientes de RV	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pelos ambientes de RV	4.78	±0.438			4.75	±0.447		
	Os ambientes de RV tem uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.77	±0.445	0.870		4.75	±0.447	0.869	
	Os ambientes de RV são funcionais e organizados, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar neles	4.76	±0.476			4.69	±0.479		
	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pelos ambientes de RA	4.76	±0.435			4.75	±0.447		
Atitudes para com os ambientes de RA	Os ambientes de RA tem uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.74	±0.481	0.879		4.88	±0.342	0.845	
	Os ambientes de RA são funcionais e organizados, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar neles	4.74	±0.470			4.75	±0.447		
	O uso das audiodescrições facilitou minha compreensão dos conceitos básicos e avanços de Biologia Celular	4.79	±0.479			4.75	±0.447		
Atitudes para com as audiodescrições	As audiodescrições foram bem escritas e são fáceis de entender	4.74	±0.487			4.69	±0.479		
	As audiodescrições contêm informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidas através da consulta de material de referência confiável	4.80	±0.514	0.882		4.81	±0.403	0.857	
	As audiodescrições facilitaram minha compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares	4.77	±0.496			4.88	±0.342		
	Os textos explicativos facilitaram minha compreensão dos conceitos básicos e avanços de Biologia Celular	4.83	±0.394	0.849		4.88	±0.342	0.878	

Atitudes para com os textos explicativos	Os textos explicativos foram bem escritos e são fáceis de entender	4.75	±0.480	4.88	±0.342	
	Os textos explicativos contém informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidos através da consulta de material de referência confiável	4.82	±0.418	4.94	±0.250	
	Os textos explicativos facilitaram minha compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares	4.81	±0.412	4.94	±0.250	
Atitudes para com os modelos 3D	Os modelos 3D contém informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidos através da consulta de material de referência confiável	4.85	±0.368	4.81	±0.403	0.874
	Os modelos 3D facilitaram minha compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares	4.86	±0.347	4.88	±0.342	
Atitudes para com a interface de alteração de cores	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pela interface de alteração de cores	4.78	±0.457	4.75	±0.447	
	A interface de alteração de cores tem uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.75	±0.450	4.81	±0.403	0.899
	A interface de alteração de cores é funcional e organizada, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar nela	4.77	±0.447	4.88	±0.342	
	O conteúdo do site constitui uma fonte relevante de informação e contribuiu positivamente para a minha aprendizagem de Biologia Celular	4.84	±0.385	4.75	±0.447	
Atitudes para com o site (geral)	O uso das ferramentas de aprendizagem do site tomou o conteúdo de Biologia Celular mais acessível	4.80	±0.533	4.81	±0.403	
	O uso das ferramentas de aprendizagem do site tomou o conteúdo de Biologia Celular mais envolvente para mim	4.74	±0.546	4.88	±0.342	0.917
	O uso das ferramentas de aprendizagem do site me ajudou a entender conceitos básicos e avançados de Biologia Celular	4.77	±0.474	4.81	±0.403	
	O uso das ferramentas de aprendizagem presentes no site me ajudou a recuperar defasagens em conceitos básicos e avançados de Biologia Celular	4.68	±0.566	4.81	±0.403	

Acredito que a utilização das ferramentas didáticas do site me estimulou a participar mais ativamente das aulas de Biologia Celular	4.64	±0.655	4.81	±0.403
Acredito que as ferramentas didáticas do site proporcionaram acesso mais fácil aos materiais de aprendizagem do que metodologias mais tradicionais, como um livro-texto, por exemplo	4.74	±0.516	4.75	±0.447
Acredito que posso utilizar as ferramentas didáticas do site como material de estudo suplementar aos que já utilizo, como slides e livros-texto	4.81	±0.446	4.75	±0.447

Participaram da etapa de avaliação das ferramentas 13 professores de Biologia Celular que atuaram em dez diferentes cursos de graduação (Aquacultura, Biomedicina, Ciências Biológicas, Enfermagem, Farmácia, Fonoaudiologia, Medicina, Medicina Veterinária, Nutrição e Odontologia) da UFMG. Entre estes professores, 6 eram do sexo masculino (46%) e 7 do sexo feminino (54%). Conforme descrito na Tabela 3, enquanto 5 desses participantes tinham 10 ou mais anos de experiência ministrando aulas de Biologia Celular (média = 15,8 anos), os 8 restantes tinham no máximo 4 anos de experiência (média = 3,2 anos).

Tabela 3: Idade e tempo de experiência dos professores experientes e em início de carreira que participaram deste estudo.

Professores de Biologia Celular			Anos de Experiência	
	N	Porcentagem	Média	DP
Experientes	5	38	15.8	±7.5
Em Início de Carreira	8	62	3.2	±1.1
Total do Grupo	13	100		

Conforme indicado na Tabela 4, as atitudes para com as ferramentas de aprendizagem foram positivas tanto entre professores experientes quanto entre aqueles em início de carreira (médias gerais de concordância elevadas para todos os indicadores). Para os professores experientes as atitudes mais positivas foram direcionadas para os ambientes de RV, os textos explicativos e os modelos 3D (fato indicado pelas médias gerais 4.73, 4.68 e 4.67, respectivamente). Já entre os professores em início de carreira, as atitudes mais positivas foram direcionadas para com os ambientes de RV e os modelos 3D (média geral de 4.84). Ao analisar os indicadores de satisfação com os níveis de complexidade abordados, observamos que tanto professores experientes quanto em início de carreira demonstraram atitudes positivas para com as audiodescrições, textos explicativos e modelos 3D (médias de concordância iguais ou superiores a 4.60). Além disso, ambos os grupos demonstraram atitudes positivas para com a experiência geral fornecida pelo site. Em ambos os grupos os indicadores com médias de concordância mais altas são:

“Eu definitivamente usaria as ferramentas de aprendizagem do site em minhas aulas de Biologia Celular” (4.80 para professores experientes e 4.88 para professores em início de carreira) e

“O conteúdo do site constitui uma fonte relevante de informação e contribuiu positivamente para aprendizagem de Biologia Celular pelos estudantes” (4,60 para professores experientes e 4,88 para professores em início de carreira).

Finalmente ao analisar os desvios-padrões e os valores atribuídos ao alfa de Cronbach, detectamos uniformidade (evidenciada pelos baixos valores de desvios-padrão para todos os indicadores) e confiabilidade (indicada pelos alfas de Cronbach superiores a 0.8 para todos os indicadores) nas respostas dos professores participantes de ambos os grupos.

Tabela 4: Atitudes dos professores experientes e dos professores em início de carreira para com as ferramentas de aprendizagem e para com o site.

Construto	Indicador	Professores Experientes				Professores em Início de Carreira			
		Média de Concordância ± DP	Média Geral	α de Cronbach		Média de Concordância ± DP	Média Geral	α de Cronbach	
Atitudes para com os ambientes de RV	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pelos ambientes de RV	4.60	±0.548			4.88	±0.354		
	Os ambientes de RV têm uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.80	±0.447	4.73	0.882	4.75	±0.463	4.84	0.891
	Os ambientes de RV são funcionais e organizados, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar neles	4.80	±0.447			4.88	±0.354		
Atitudes para com os ambientes de RA	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pelos ambientes de RA	4.40	±0.548			4.88	±0.354		
	Os ambientes de RA têm uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.40	±0.548	4.53	0.833	4.63	±0.518	4.80	0.810
	Os ambientes de RA são funcionais e organizados, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar neles	4.80	±0.447			4.88	±0.354		
Atitudes para com as audiodescrições	O uso das audiodescrições facilitou minha compreensão dos conceitos básicos e avançados de Biologia Celular	4.60	±0.548			4.75	±0.463		
	As audiodescrições foram bem escritas e são fáceis de entender	4.40	±0.548			4.38	±0.518		
	As audiodescrições contêm informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidas através da consulta de material de referência confiável	4.60	±0.894	4.64	0.855	4.75	±0.463	4.63	0.877
	O nível de complexidade dos temas abordados nas audiodescrições é compatível com a etapa de aprendizagem para a qual foram propostas (graduação)	4.80	±0.447			4.63	±0.518		

Atitudes para com os textos explicativos	As audiodescrições facilitaram a compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares pelos estudantes	4.80	±0.447	4.63	±0.518
	Os textos explicativos facilitaram minha compreensão dos conceitos básicos e avançados de Biologia Celular	4.80	±0.447	4.75	±0.463
	Os textos explicativos foram bem escritos e são fáceis de entender	4.80	±0.447	4.75	±0.463
	Os textos explicativos contêm informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidos através da consulta de material de referência confiável	4.40	±0.548	4.88	±0.354
	O nível de complexidade dos temas abordados nos textos explicativos é compatível com a etapa de aprendizagem para a qual foram propostos (graduação)	4.80	±0.447	4.75	±0.463
Atitudes para com os modelos 3D	Os textos explicativos facilitaram a compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares pelos estudantes	4.60	±0.548	4.88	±0.354
	Os modelos 3D contêm informações confiáveis e atualizadas e foram desenvolvidos através da consulta de material de referência confiável	4.60	±0.894	4.88	±0.354
	O nível de complexidade dos temas abordados nos modelos 3D é compatível com a etapa de aprendizagem para a qual foram propostos (graduação)	4.60	±0.548	4.75	±0.463
	Os modelos 3D facilitaram a compreensão da morfologia e do funcionamento de organelas e estruturas celulares pelos estudantes	4.80	±0.447	4.88	±0.354
	Estou satisfeito com a experiência proporcionada pela interface de alteração de cores	4.40	±0.894	4.88	±0.354
Atitudes para com a interface de alteração de cores	A interface de alteração de cores tem uma boa apresentação visual e seus layouts e padrões de cores são visualmente confortáveis	4.00	±0.707	4.63	±0.518
	A interface de alteração de cores é funcional e organizada, pois localizei facilmente informações e temas de interesse ao navegar nela	4.40	±0.894	4.88	±0.354
Atitudes para com o site (geral)	O conteúdo do site constitui uma fonte relevante de informação e contribuiu positivamente para aprendizagem de Biologia Celular pelos estudantes	4.60	±0.548	4.88	±0.354
			4.43	4.83	0.845
			0.850		

O uso das ferramentas de aprendizagem do site pode facilitar o aprendizado do conteúdo de Biologia Celular pelos estudantes	4.40	±0.894	4.75	±0.463
O uso das ferramentas de aprendizagem do site pode tornar o conteúdo de Biologia Celular mais atrativo para os estudantes	4.20	±0.837	4.88	±0.354
O uso das ferramentas de aprendizagem do site pode ajudar os estudantes a entender conteúdos básicos e avançados de Biologia Celular	4.40	±0.548	4.88	±0.354
O uso das ferramentas de aprendizagem presentes no site podem ajudar os estudantes a recuperar defasagens em conceitos básicos e avançados de Biologia Celular	4.20	±0.837	4.75	±0.463
Eu definitivamente usaria as ferramentas de aprendizagem do site em minhas aulas de Biologia Celular	4.80	±0.447	4.88	±0.354

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou o desenvolvimento e validação de um site inclusivo para o ensino de Biologia Celular baseado em tecnologias de RV e RA. Durante o desenvolvimento, aplicamos princípios da PDE para criar ferramentas acessíveis e interativas, permitindo que estudantes, independentemente de suas capacidades visuais, tivessem uma experiência imersiva na aprendizagem de estruturas e processos celulares. Os resultados das avaliações realizadas com estudantes e professores indicam que as ferramentas de aprendizagem são adequadas à sua finalidade e adequadas para estudantes de graduação. Considerando que tanto estudantes quanto professores são provenientes de diferentes cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas, os resultados também demonstram que as ferramentas desenvolvidas são eficazes para o ensino de Biologia Celular para diferentes públicos e em diferentes contextos educacionais.

Notavelmente, nosso trabalho é pioneiro no desenvolvimento e na implementação de um site educacional com tão vasto acervo de modelos 3D integrados às RV e RA e enriquecido com parâmetros de acessibilidade, incluindo audiodescrições detalhadas e uma interface de alteração de cores. A incorporação destes mecanismos de acessibilidade foi uma das contribuições mais significativas deste estudo, pois reforça a importância de garantir que estudantes com deficiência visual tenham acesso equitativo a ferramentas de aprendizagem de Biologia Celular. As atitudes positivas provenientes de estudantes com deficiência visual para com esses parâmetros de acessibilidade demonstram que as estratégias implementadas foram eficazes em tornar o site mais inclusivo e acessível, promovendo maior autonomia e engajamento desses estudantes.

Além de utilizar modelos 3D aliados às tecnologias de RV e RA, investimos na confecção de textos explicativos, que simultaneamente procuram complementar o conteúdo dos modelos 3D e também trazem explicações sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular. Ao desenvolver estes textos tomando como base de livros de referência em Biologia Celular e artigos científicos, procuramos garantir a credibilidade e a confiabilidade das informações apresentadas. A utilização dessas fontes permite que os conteúdos sejam respaldados pelo conhecimento consolidado na literatura acadêmica e alinhados às descobertas mais recentes da área, assegurando que estudantes e professores tenham acesso a informações precisas e cientificamente embasadas. Adicionalmente, a metodologia de aprendizagem pela leitura de textos explicativos permite que esses materiais sejam utilizados como introdução ou parte do desenvolvimento conceitual de um tema, favorecendo a estruturação do conhecimento ao longo

do aprendizado, e como um meio para abordar conteúdos complementares, ampliando o entendimento dos estudantes (HORNES; SANTOS, 2015). As atitudes positivas de estudantes com visão típica, estudantes com deficiência visual e professores demonstraram que os textos explicativos que desenvolvemos são eficazes como metodologia de aprendizagem. Os participantes destacaram que esses textos contribuíram significativamente para a compreensão da morfologia e do funcionamento das estruturas celulares, facilitando tanto a assimilação de conceitos complexos quanto a recuperação de lacunas no aprendizado. Em particular, os estudantes com deficiência visual relataram que os textos explicativos desempenharam um papel essencial na complementação das audiodescrições, permitindo-lhes explorar o conteúdo de forma mais aprofundada e autônoma. Da mesma forma, professores experientes e em início de carreira ressaltaram que os textos explicativos possuem um nível adequado de complexidade para o ensino de Biologia Celular no nível superior e que podem ser utilizados como material de apoio complementar em sala de aula.

Outro aspecto relevante a ser destacado é que as plataformas, softwares e serviços utilizados no desenvolvimento dos modelos 3D e do site são de fácil utilização, favorecendo sua adoção por docentes e estudantes sem a necessidade de formação técnica especializada. Mais que isso, a maioria das ferramentas utilizadas é gratuita ou de baixo custo, o que viabilizou a implementação do projeto em um contexto acadêmico com recursos limitados, e que reforça o potencial de replicabilidade da proposta em diferentes instituições de ensino (PANZERA-GONÇALVES; OLIVEIRA, 2025).

Conforme mencionado anteriormente, as TDICs incluem ferramentas que se conectam à internet para ampliar as possibilidades de comunicação (VALENTE, 2013). O uso dessas tecnologias em contextos educativos vem crescendo, com a exploração de novas aplicações para o ensino de Biologia Celular. O Visual Guide to Human Cells do Allen Institute for Cell Science, por exemplo, destaca-se, pois, oferece um modelo 3D interativo representativo de uma célula humana que é segmentado a partir de dados reais e proporciona uma compreensão detalhada das funções e localizações das organelas e estruturas celulares (ALLEN INSTITUTE FOR CELL SCIENCE, 2025). Apesar de sua riqueza visual e científica desta ferramenta, a acessibilidade para estudantes com deficiência visual é limitada, uma vez que o site disponibiliza apenas uma funcionalidade de aumento do tamanho do texto, sem suporte explícito a tecnologias assistivas mais abrangentes. Nossa proposta, ao contrário, integra modelos 3D com audiodescrições e uma interface de alteração de cores, permitindo que estudantes com deficiência visual possam explorar conceitos de Biologia Celular complexos de forma imersiva e independente.

A ampliação do uso das TDICs em contextos educativos reforça, ainda, a necessidade de avaliar a efetividade dessas tecnologias, bem como estabelecer parâmetros que garantam a acessibilidade por estudantes com deficiência visual. Tal preocupação se intensifica com o receio de que os rápidos avanços tecnológicos possam ampliar a exclusão digital, caso os desafios de acessibilidade enfrentados por pessoas com deficiência visual no acesso à internet não sejam solucionados (HAFIAR; SUBEKTI; NUGRAHA, 2019). Estudos anteriores têm demonstrado o uso de recursos online para ampliar as possibilidades de aprendizagem para estudantes com deficiência visual. Por exemplo, ALMEIDA et al. (2020) desenvolveram um livreto online acessível que, assim como o nosso trabalho, adota um conjunto robusto de estratégias baseadas nas WCAG, audiodescrições, descrições textuais alternativas, funcionalidades de contraste, ajuste de fonte e zoom e codificação em HTML, CSS e JavaScript para permitir que usuários com deficiência visual pudessem navegar e interagir de forma autônoma com conteúdos de ensino de Segurança e Saúde Ocupacional. Este estudo demonstrou que recursos visuais, como vídeos e imagens, podem ser ajustados para utilização por pessoas com deficiência visual. Apesar de não utilizarmos vídeos em nosso trabalho, incorporamos descrições alternativas nas imagens do site, focamos na potencialidade da RV e da RA e desenvolvemos modelos 3D representativos de processos celulares, os quais foram dotados de animações dinâmicas para facilitar a compreensão por estudantes com deficiência visual.

As audiodescrições compreenderam um dos parâmetros de acessibilidade mais importantes desenvolvidos neste trabalho e foram apresentadas em dois formatos, um escrito e um falado. Enquanto que com o primeiro formato propusemos a utilização das audiodescrições com leitores de tela, com o segundo formato oferecemos a opção de acesso direto ao conteúdo, sem a necessidade de softwares adicionais. Essa abordagem amplia a acessibilidade, permitindo que usuários com diferentes preferências e necessidades escolham a forma mais adequada de interação com o material. Além disso, a disponibilização de ambos os formatos favorece a flexibilidade no consumo das informações, atendendo desde usuários acostumados com leitores de tela até aqueles que preferem ouvir a narração de maneira independente. Outro aspecto relevante foi o uso eficiente da inteligência artificial na geração da versão falada. A utilização de uma ferramenta de conversão de texto em fala com entonação humanizada garantiu uma experiência auditiva mais fluida e natural, aproximando-se da narração realizada por humanos. Esse recurso não apenas agilizou o processo de criação das audiodescrições, mas também assegurou um padrão de qualidade e clareza na transmissão da informação. Dessa forma, a

tecnologia foi empregada de maneira criteriosa, visando à acessibilidade sem comprometer a inteligibilidade do conteúdo.

Adaptar um site para exibição em dispositivos móveis pode ser desafiador devido à ampla variedade de modelos disponíveis no mercado, que diferem em tamanho de tela, resolução, capacidade de processamento e compatibilidade com diferentes sistemas operacionais (TILLEY; TOETER; WONG, 2001). Apesar dessa dificuldade, aplicamos princípios de design responsivo para tornar nosso site acessível no maior número de aparelhos possível, incluindo smartphones e tablets. Acreditamos que assegurar a responsividade em diferentes plataformas representa não apenas um avanço técnico, mas também um compromisso com a inclusão e a equidade no acesso ao conhecimento, tendo em vista o crescente uso desses dispositivos em contextos educacionais (QUIROGA; BESSA, 2024).

Diante dos resultados obtidos, este estudo reforça a importância da implementação de tecnologias acessíveis e inovadoras no ensino de Biologia Celular, destacando o impacto positivo das ferramentas baseadas em RA e RV na aprendizagem de estudantes com e sem deficiência visual. A validação do site junto a diferentes públicos acadêmicos evidencia o potencial do site desenvolvido como um recurso complementar para o ensino de Biologia Celular, promovendo maior equidade no acesso ao conhecimento e incentivando práticas pedagógicas mais inclusivas. Assim sendo, acreditamos que este trabalho contribui para a expansão de iniciativas voltadas à inclusão digital e ao ensino, reforçando o papel das TDICs na construção de um ambiente acadêmico mais acessível e igualitário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELAAL, Yasmin; AL-THANI, Dena. Accessibility first: detecting frustration in web browsing for visually impaired and sighted smartphone users. *Universal Access in the Information Society*, v. 24, n. 1, p. 339–355, 24 mar. 2025.
- ADAMS, Saira-Banu; TUCKER, William D; VENTER, Isabella M. Generalization of Tooltips: An Assistive Technology Extension. [S.l: s.n.], 2017. p. 213–222. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71084-6_24>.
- AFSHARIPOUR, Mohammadhossein; MAGHOUL, Pooneh. Towards Education 4.0 in Geotechnical Engineering Using a Virtual Reality/Augmented Reality Visualization Platform. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 42, n. 4, p. 2657–2673, 21 jun. 2024.
- AHUJA, Vivek. Equity and Access in Digital Education. [S.l: s.n.], 2023. p. 45–59.

- AKPEN, Catherine Nabiem *et al.* Impact of online learning on student's performance and engagement: a systematic review. *Discover Education*, v. 3, n. 1, p. 205, 1 nov. 2024.
- ALLEN INSTITUTE FOR CELL SCIENCE. *Visual Guide to Human Cells*. Disponível em: <<https://www.allencell.org/visual-guide-to-human-cells.html>>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- ALMEIDA, Ana Margarida Pisco *et al.* Development of an online digital resource accessible for students with visual impairment or blindness: Challenges and strategies. *Work*, v. 65, n. 2, p. 333–342, 20 fev. 2020.
- ATABEK, Oğuzhan. CHALLENGES IN INTEGRATING TECHNOLOGY INTO EDUCATION. *Turkish Studies - Information Technologies and Applied Sciences*, v. 14, n. ITAS Volume 14 Issue 1, p. 1–19, 1 jan. 2019. Disponível em: <<http://www.turkishstudies.net/DergiTamDetay.aspx?ID=14810>>.
- AZUMA, R. *et al.* Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 21, n. 6, p. 34–47, 2001.
- BEAULIEU, Elaine; PETIT-TURCOTTE, Caroline. Gamification of learning in an introductory cell biology class. *The FASEB Journal*, v. 32, n. S1, abr. 2018.
- BEIER, Sofie *et al.* Increased letter spacing and greater letter width improve reading acuity in low vision readers. *Information Design Journal*, v. 26, n. 1, p. 73–88, 19 jul. 2021.
- BENNETT, Jennifer A.; SAUNDERS, Colin P. A Virtual Tour of the Cell: Impact of Virtual Reality on Student Learning and Engagement in the STEM Classroom. *Journal of Microbiology & Biology Education*, v. 20, n. 2, jan. 2019.
- BLENDER FOUNDATION. *Blender 4.1*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.blender.org>>. , 2024
- BRASIL. *Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015 - Lei de Inclusão de Pessoas com Deficiência*. . Brasília, DF: [s.n.], 2015
- BRASIL. *Portaria 310, de 27 de junho de 2006*. . Brasília, DF: Diário Oficial da União, n. 122, Seção 1, p. 34. , 2006
- CIPRESSO, Pietro *et al.* The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, v. 9, 6 nov. 2018.

- DALKE, H. *et al.* A Colour Contrast Assessment System: Design for People with Visual Impairment. *Designing Inclusive Interactions*. London: Springer London, 2010. p. 101–110.
- DEMUNER, Jocelino Antonio *et al.* Digital culture in education: opportunities and challenges. *ARACÊ*, v. 6, n. 3, 8 nov. 2023.
- DOGUSOY, Berrin; CICEK, Filiz; CAGILTAY, Kursat. How Serif and Sans Serif Typefaces Influence Reading on Screen: An Eye Tracking Study. [S.l: s.n.], 2016. p. 578–586.
- ERICKSON, Austin *et al.* An Extended Analysis on the Benefits of Dark Mode User Interfaces in Optical See-Through Head-Mounted Displays. *ACM Transactions on Applied Perception*, v. 18, n. 3, p. 1–22, 31 jul. 2021.
- ERICKSON, Austin *et al.* Effects of Dark Mode Graphics on Visual Acuity and Fatigue with Virtual Reality Head-Mounted Displays. mar. 2020, [S.l.]: IEEE, mar. 2020. p. 434–442.
- GARG, Shivi; BALIYAN, Niyati. Comparative analysis of Android and iOS from security viewpoint. *Computer Science Review*, v. 40, p. 100372, maio 2021.
- GIURGIU, Luminita; GLIGOREA, Ilie. Responsive Web Design Techniques. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, v. 23, n. 3, p. 37–42, 27 jun. 2017.
- GONÇALVES, Júlio Panzera *et al.* Teaching Cell Biology to a student who is blind: promoting inclusion and teacher training in higher education. *International Journal of Inclusive Education*, 2025.
- GOOGLE. *Cloud Storage for Firebase*. Disponível em: <<https://firebase.google.com/docs/storage>>. Acesso em: 23 jun. 2024a.
- GOOGLE. *Firebase Hosting*. Disponível em: <<https://firebase.google.com/docs/hosting>>. Acesso em: 23 jun. 2024b.
- GOOGLE. *model-viewer API Documentation*. Disponível em: <<https://modelviewer.dev/docs/faq.html#api-questions>>. Acesso em: 23 jun. 2024c.
- GOOGLE. *Setting Accessibility in Google Chrome*. Disponível em: <<https://support.google.com/chrome/answer/96810>>. Acesso em: 28 jun. 2024d.

- GOOGLE FONTS. *Quicksand*. Disponível em: <<https://fonts.google.com/specimen/Quicksand>>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- GÖTZ, Friedrich M.; STIEGER, Stefan; REIPS, Ulf-Dietrich. Users of the main smartphone operating systems (iOS, Android) differ only little in personality. *PLOS ONE*, v. 12, n. 5, p. e0176921, 3 maio 2017.
- HAFIAR, Hanny; SUBEKTI, Priyo; NUGRAHA, Aat Ruchiat. Internet Utilization by the Students with Visual Impairment Disabilities. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, v. 14, n. 10, p. 200–207, 30 maio 2019.
- HAIR, J.R. *et al. Análise Multivariada de Dados*. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HAMIDEH KERDAR, Sara; BÄCHLER, Liane; KIRCHHOFF, Britta Marleen. The accessibility of digital technologies for people with visual impairment and blindness: a scoping review. *Discover Computing*, v. 27, n. 1, p. 24, 1 ago. 2024.
- HEXANOMAD. *Nomad Sculpt 1.90*. . [S.l.]: App Store. Disponível em: <<https://apps.apple.com/br/app/nomad-sculpt/id1519508653>>. , 2024
- HORNES, Andréia; SANTOS, Sandro Aparecido Dos. Scientific reading as a didactic resource for significant learning in physics. *Polyphonia*, v. 26, n. 2, p. 471–483, 2015.
- HUNTSMAN, Sherena. An Image for All: The Rhetoric for Writing Alt-Text. jul. 2022, [S.l.]: IEEE, jul. 2022. p. 49–52. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9881714>>.
- IBM. *IBM SPSS Statistics 27.0.1*. . [S.l.]: IBM. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/spss>>. , 2024
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. *Censo da Educação Superior 2021 - Divulgação dos resultados*. . [S.l.: s.n.], 2022.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. *Sinopses Estatísticas da Educação Superior - Graduação*. . [S.l.: s.n.], 2011.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. *Sinopses Estatísticas da Educação Superior - Graduação*. . [S.l.: s.n.], 2021.

- KADYROV, R. I. Developing of USDZ models for 3D digital analysis results visualization in augmented reality. *Scientific Visualization*, v. 13, n. 1, 2021.
- KAR, Sambit Prasad; GHOSH, Maitrish; ROUT, Nirmal Kumar. Augmented Reality as a Supported Educational Method for Embedded Devices and Technology. [S.l: s.n.], 2021. p. 501–508.
- KIRNER, Claudio; KIRNER, Tereza Gonçalves. Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada. *Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências*. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Computação, 2011. p. 10–25.
- LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159, mar. 1977. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2529310?origin=crossref>>.
- LIKERT, Rensis. *A technique for measurement of attitudes*. [S.l.]: Archives of Psychology, 1932.
- LOWRY, Paul Benjamin; WILSON, David W.; HAIG, William L. A Picture is Worth a Thousand Words: Source Credibility Theory Applied to Logo and Website Design for Heightened Credibility and Consumer Trust. *International Journal of Human-Computer Interaction*, v. 30, n. 1, p. 63–93, 2 jan. 2014.
- MAKRYDAKIS, Nektarios. The phenomenon of the ever-increasing impact of visual content on search engines' websites ranking and the indicated SEO adjustments. mar. 2024.
- MATHUR, Mrudang; BROZOVICH, Josef M.; RAUSCH, Manuel K. A brief note on building augmented reality models for scientific visualization. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 213, p. 103851, jan. 2023.
- MATTHIENSEN, Alexandre. *Uso do Coeficiente Alfa de Cronbach em Avaliações por Questionários*. 1. ed. Boa Vista, Roraima: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro de Pesquisa Agroflorestal de Roraima Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/936813/1/DOC482011ID112.pdf>>.
- MCGREAL, Rory. The Internet: A Learning Environment. *New Directions for Teaching and Learning*, v. 1997, n. 71, p. 67–74, 14 set. 1997.

- MCKENNEY, Susan; REEVES, Thomas. *Conducting Educational Design Research*. London: Routledge, 2012.
- MICROSOFT. *Accessibility Features in Microsoft Edge*. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/en-us/microsoft-edge/accessibility-features-in-microsoft-edge-4c696192-338e-9465-b2cd-bd9b698ad19a>>. Acesso em: 28 jun. 2024a.
- MICROSOFT. *Microsoft Excel LTSC MSO*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://products.office.com/excel/>>. , 2024b
- MICROSOFT. *Visual Studio Code 1.90.0*. . [S.l.]: Microsoft. Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/>>. , 2024c
- MINAS GERAIS. *Decreto nº 46.264 de 2013 - Plano Estadual dos Direitos da Pessoa com Deficiência* -. . Belo Horizonte, MG: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/46264/2013/>. , 2013
- MONTEIRO, Fábio Ferreira. Análise de uma experiência híbrida no ensino de Física 1. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021.
- MOTT, Martez E; TANG, John; CUTRELL, Edward. Accessibility of Profile Pictures: Alt Text and Beyond to Express Identity Online. 19 abr. 2023, New York, NY, USA: ACM, 19 abr. 2023. p. 1–13. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3544548.3580710>>.
- MOZILLA. *Accessibility Features in Firefox*. Disponível em: <<https://support.mozilla.org/en-US/kb/accessibility-features-firefox>>. Acesso em: 28 jun. 2024.
- NAI. *NAI - Núcleo de Acessibilidade e Inclusão da UFMG*. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/nai/>>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- NV ACCESS. *NonVisual Desktop Access 2024.1.0.31547*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nvaccess.org/>>. , 2024
- PANZERA-GONÇALVES, Júlio; OLIVEIRA, Cleida Aparecida. Development, application and evaluation of tools based on virtual and augmented realities for inclusive teaching and learning of cell membranes. *Anatomical Sciences Education*, p. 1–23, 10 mar. 2025. Disponível em: <<https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ase.70024>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

- PLOMP, Tjeerd; NIEVEEN, Nienke. *An introduction to educational design research: Proceedings of the seminar conducted at the East China Normal University, Shanghai (Pr china), November 23-26, 2007*. 3. ed. Enschede: SLO, 2010.
- QUIROGA, Fernando Lionel; BESSA, Rosângela De. A educação em tempos de smartphones e redes sociais: por uma crítica permanente no enfrentamento da dessubjetivação e monitoramento. *Texto Livre*, v. 17, 2024.
- RAHIM, Fanny Rahmatina. Facing the Industrial Revolution 4.0: Increasing Teacher Competence through the Technical Guidance on Making Digital Teaching Materials. *Pelita Eksakta*, v. 4, n. 1, p. 55, 31 mar. 2021. Disponível em: <<http://pelitaeksakta.ppj.unp.ac.id/index.php/pelitaeksakta/article/view/119>>.
- REINKE, Nicole B.; KYNN, Mary; PARKINSON, Ann L. Immersive 3D Experience of Osmosis Improves Learning Outcomes of First-Year Cell Biology Students. *CBE—Life Sciences Education*, v. 20, n. 1, p. ar1, mar. 2021.
- REQUE, Marluce; BUENO, Juliana; LIMA, Caroline Rodrigues De. Recomendações para o desenvolvimento de interfaces gráficas acessíveis ao público de baixa visão. maio 2022, São Paulo: Editora Blucher, maio 2022. p. 717–731.
- RHYNE, Theresa-Marie. Applying color theory to digital media and visualization. 5 ago. 2012, New York, NY, USA: ACM, 5 ago. 2012. p. 1–82.
- SHIPLEY, David; HOOKY, Graham J.; WALLACE, Simon. The Brand Name Development Process. *International Journal of Advertising*, v. 7, n. 3, p. 253–266, 2 jan. 1988. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02650487.1988.11107064>>.
- SIQUEIRA, Gisele Carvalho De *et al.* Digital Information and Communication Technologies (DICT), teacher training and Zoology content: a mapping in national publications within the scope of Science Teaching. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e617974496, 28 maio 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4496>>.
- SKETCHFAB. *Sketchfab Viewer API Documentation*. Disponível em: <<https://sketchfab.com/developers/viewer/>>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- SOUZA E SILVA, Renata; DA CUNHA LIMA FREIRE, Gustavo; CERQUEIRA, Gilberto Santos. The impact of the integration of digital platforms and active teaching strategies (Kahoot!) on the performance of Brazilian medical course students in the discipline of

- histology. *Anatomical Sciences Education*, v. 17, n. 6, p. 1229–1238, 12 set. 2024. Disponível em: <<https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.2433>>.
- TEXT-TO-SPEECH-ONLINE. *Free Text to Speech Online Converter Tools*. Disponível em: <<https://www.text-to-speech.online/>>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- TILLEY, S.; TOETER, B.; WONG, K. Issues in accessing Web sites from mobile devices. 2001, [S.l.]: IEEE, 2001. p. 97–104.
- TINKOV, R. *Qanelas Soft Free Font*. Disponível em: <<https://www.tinkov.info/qanelas-soft.html>>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- TRACY, Claire B. *et al.* Why Students Struggle in Undergraduate Biology: Sources and Solutions. *CBE—Life Sciences Education*, v. 21, n. 3, set. 2022.
- TURHAN, Berk; GÜMÜŞ, Zeynep H. A Brave New World: Virtual Reality and Augmented Reality in Systems Biology. *Frontiers in Bioinformatics*, v. 2, 6 abr. 2022.
- TWEAKNOW SOFTWARE. *Fast QR Code Maker 3.0.0*. . [S.l.]: Microsoft Store. Disponível em: <<https://apps.microsoft.com/detail/9n570b7r2zz5?hl=pt-br&gl=BR>>. , 2024
- VALENTE, José Armando. Integração Currículo e Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação: a passagem do currículo da era do lápis e papel para o currículo da era digital. In: CAVALHERI, A; ENGERROFF, S. N.; SILVA, J. C (Org.). . *As Novas Tecnologias e os Desafios para uma Educação Humanizadora*. 1. ed. Santa Maria: Biblos Editora, 2013. p. 113–132.
- VAN DEN AKKER, Jan *et al.* *Educational Design Research*. London: Routledge, 2006. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781134155651>>.
- WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. *Developing an Accessibility Statement*. Disponível em: <<https://www.w3.org/WAI/planning/statements/>>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. *Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web (WCAG) 2.1*. Disponível em: <<https://www.w3c.br/traducoes/wcag/wcag21-pt-BR/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. *Images Tutorial*. Disponível em: <<https://www.w3.org/WAI/tutorials/images/>>. Acesso em: 14 mar. 2025a.

WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. Disponível em: <<https://www.w3.org/TR/WCAG21/>>. Acesso em: 9 mar. 2025b.

YOOYATIVONG, Thongchai. Developing Teacher's Digital Skills Based on Collaborative Approach in Using Appropriate Digital Tools to Enhance Teaching Activities. nov. 2018, [S.l.]: IEEE, nov. 2018. p. 156–160. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8686614/>>.

ZHANG, Jun-Ming; AN, Jianxiong. Cytokines, Inflammation, and Pain. *International Anesthesiology Clinics*, v. 45, n. 2, p. 27–37, 2007. Disponível em: <<https://journals.lww.com/00004311-200704520-00004>>.

ZINE EOOD. *Boostrap Studio 6.7.3*. . [S.l: s.n.], 2024

5. DISCUSSÃO INTEGRADORA DOS RESULTADOS

5. DISCUSSÃO INTEGRADORA DOS RESULTADOS

No presente trabalho relatamos a aplicação e a validação de ferramentas de ensino - aprendizagem baseadas em multissensorialidade, RV e RA para o ensino de Biologia Celular para estudantes com visão típica e com deficiência visual no ensino superior. Os relatos e resultados foram estruturados em três artigos científicos, com intuito de detalhar as metodologias e as contribuições individuais de cada estudo.

O primeiro artigo descreveu as experiências de ensino -aprendizagem de um estudante cego no contexto do ensino de Biologia Celular, mediado por um estagiário com visão típica que desenvolveu e aplicou estratégias pedagógicas baseadas em multissensorialidade, Design Universal para a Aprendizagem (DUA) e metodologias ativas, com intuito de reduzir lacunas de aprendizagem. A intervenção incluiu o uso de modelos 3D táteis de organelas celulares, representações impressas com suporte em braille, desenhos esquemáticos feitos à mão com contornos em alto relevo e explicações orais detalhadas. O planejamento pedagógico foi fundamentado no construtivismo social de Vygotsky, cujos princípios advogam que a aprendizagem significativa toma por base os conhecimentos prévios do indivíduo aliados a experiências e ferramentas significativas (VYGOTSKY, 2022). O estudante demonstrou progresso significativo, evidenciado pelo aumento da participação em atividades em sala de aula, melhoria na comunicação oral, maior segurança ao discutir os conceitos estudados e impacto positivo na motivação e na autoestima. Além disso, os resultados de testes avaliativos, adaptados com recursos táteis, indicaram um avanço na assimilação dos conteúdos, com respostas classificadas majoritariamente como satisfatórias ou mais que satisfatórias, o que reforça a importância da implementação de metodologias inclusivas que respeitem a diversidade dos aprendizes e promovam equidade no ensino superior.

O segundo artigo concentrou-se no desenvolvimento e avaliação de ferramentas de RV e RA para o ensino de membranas celulares, abordando a criação de modelos 3D interativos, apropriados tanto para estudantes com visão típica quanto para estudantes com deficiência visual. O estudo seguiu uma abordagem baseada na pesquisa em design educacional (PDE), estruturada em três fases: pesquisa preliminar, prototipagem e validação (MCKENNEY; REEVES, 2012; PLOMP; NIEVEEN, 2010). Na fase preliminar, realizou-se uma extensa revisão da literatura sobre ensino de Biologia Celular e acessibilidade educacional, além da identificação das principais dificuldades enfrentadas por estudantes na compreensão da

estrutura e função das membranas celulares. A prototipagem envolveu modelagem 3D, utilizando literatura e softwares específicos, com intuito de garantir rigor científico durante o desenvolvimento das representações de estruturas celulares. Para garantir acessibilidade, os modelos receberam dois importantes parâmetros: as audiodescrições e a interface de alteração de cores. Finalmente, a fase de validação envolveu a apresentação e a aplicação das ferramentas para alunos com visão típica, alunos com deficiência visual e professores de diferentes cursos de graduação das áreas da saúde e das biológicas. Os resultados demonstraram que as ferramentas baseadas RV e a RA foram bem recebidas, proporcionando maior imersão e engajamento aos estudantes. Os participantes relataram que a possibilidade de interagir com modelos 3D e ouvir audiodescrições detalhadas facilitou a compreensão de conceitos abstratos, especialmente para aqueles com deficiência visual. Além disso, a integração das TDICs com atividades em grupo, mostrou-se eficaz na construção de ambientes de aprendizagem mais dinâmicos e interativos, favorecendo a inclusão e a equidade na educação superior.

O terceiro artigo tratou da criação e validação de um site inclusivo para o ensino de Biologia Celular, ampliando as ferramentas de RV e RA do estudo anterior, antes voltadas ao estudo de membranas celulares, para incluir diversas organelas, estruturas e processos celulares. A metodologia adotada combinou princípios de PDE, design responsivo (GIURGIU; GLIGOREA, 2017) e de acessibilidade digital, por meio das Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo da Web (WCAG 2.1). A adoção destes princípios garantiu o desenvolvimento de uma interface responsiva em diferentes dispositivos. Além de aperfeiçoar a apresentação e acessibilidade das audiodescrições, foram incorporados esquemas acessíveis de cores, melhorias na apresentação do conteúdo textual e dicas de contexto e textos alternativos para facilitar a compreensão de imagens do site. Estudantes com visão típica e com deficiência visual, além de professores de Biologia Celular, avaliaram a plataforma quanto à usabilidade, clareza das informações, facilidade de navegação e impacto na aprendizagem. Os resultados apontaram uma avaliação altamente positiva por parte dos participantes, destacando o recurso como uma ferramenta eficaz para promover a inclusão de estudantes com diferentes necessidades educacionais e como um complemento valioso no ensino de Biologia Celular.

Os achados destes trabalhos estão alinhados com estudos anteriores que indicam que o uso de multissensorialidade e de tecnologias como RV e RA pode aumentar

significativamente o engajamento e a retenção de conhecimento, especialmente para estudantes com deficiência visual, ao permitir uma exploração mais aprofundada de conteúdos abstratos (CASTRO, 2015; CHAKER *et al.*, 2021; ENGLUND; OLOFSSON; PRICE, 2017). No entanto, desafios como restrições orçamentárias e a necessidade de treinamento docente são continuamente apontados como obstáculos para a implementação efetiva dessas tecnologias no ensino superior (ERTMER *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2021).

Visando democratizar o acesso às tecnologias educacionais e mitigar os impactos negativos de restrições orçamentárias, buscamos desenvolver ferramentas de aprendizagem para o ensino de Biologia Celular utilizando softwares gratuitos e materiais de baixo custo. Todos os recursos utilizados nos trabalhos são de fácil aquisição e, portanto, contornam possíveis barreiras financeiras que comumente impedem o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem inclusivas. Além disso, cientes da importância do treinamento de professores para o desenvolvimento de recursos didáticos baseados em tecnologias digitais, buscamos descrever detalhadamente os procedimentos utilizados para a criação das ferramentas, a fim de auxiliar outros educadores a replicarem ou adaptarem as metodologias em seus próprios contextos de ensino. Acreditamos que o acesso a esse tipo de solução pode ampliar significativamente a capacidade de instituições e professores de desenvolverem recursos próprios com autonomia e criatividade, mesmo em realidades de poucos recursos.

Para além das questões técnicas e econômicas envolvidas na produção das ferramentas de aprendizagem aqui descritas, consideramos essencial incorporar uma dimensão pedagógica centrada nos sujeitos do processo educativo. Assim, também direcionamos atenção às necessidades e perspectivas dos alunos no processo de desenvolvimento das ferramentas. O primeiro artigo oferece um exemplo particularmente importante desse compromisso, ao relatar a participação ativa de um estudante cego em seu próprio processo de aprendizagem. A escuta sensível e o diálogo constante com o estudante foram fundamentais para o planejamento das estratégias pedagógicas adotadas, reafirmando o princípio de que nenhuma decisão sobre pessoas com deficiência deve ser tomada sem sua participação direta. Conforme sintetizado no lema do movimento das pessoas com deficiência - “Nothing about us without us” -, é essencial que esses sujeitos sejam não apenas incluídos, mas também protagonistas na construção das práticas e políticas educacionais que os afetam (CHARLTON, 1998). A experiência narrada no artigo evidencia como essa participação ativa

contribuiu não apenas para a efetiva aprendizagem de Biologia Celular, mas também para o fortalecimento da autonomia, autoestima e engajamento do estudante ao longo de sua trajetória acadêmica. Nos segundo e terceiro artigos, este mesmo princípio de atenção às necessidades e perspectivas dos alunos se concretizou de maneira fundamental na fase de validação das ferramentas educacionais. A avaliação fornecida pelos estudantes com visão típica e com deficiência visual foi essencial para verificar a eficácia real dos recursos desenvolvidos. Suas percepções permitiram não apenas aferir a qualidade técnica das ferramentas, mas, sobretudo, compreender como elas impactavam o processo de aprendizagem em termos de clareza conceitual, acessibilidade, usabilidade e engajamento. As contribuições dos estudantes ajudaram a identificar pontos fortes, lacunas e possibilidades de melhoria que talvez passassem despercebidas por desenvolvedores ou docentes. Assim, o olhar dos próprios usuários finais foi determinante para legitimar pedagogicamente as soluções criadas e atestar sua utilidade prática no contexto educacional.

Esses cuidados reforçam a ideia de que os estudantes devem ser protagonistas e coautores das práticas pedagógicas, especialmente quando se trata de promover inclusão e acessibilidade. Alinhar o desenvolvimento de recursos à escuta ativa e à participação dos estudantes garante que esses materiais não apenas atendam a padrões técnicos de acessibilidade, mas que também façam sentido para quem os utiliza.

Dessa forma, esperamos que este trabalho contribua não apenas com soluções práticas para o ensino de Biologia Celular, mas também como um modelo de ação inclusiva e transformadora, que inspire novas práticas pedagógicas, pesquisas e políticas educacionais. Acreditamos que estudos futuros poderão aprofundar e ampliar ainda mais as possibilidades de aplicação de multissensorialidade e tecnologias digitais no ensino, investigando sua eficácia em diferentes disciplinas, níveis de ensino e contextos sociais, com vistas à consolidação de uma educação realmente acessível e equitativa para todos.

6. CONCLUSÃO

6. CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho demonstram que a implementação de abordagens inclusivas baseadas em multissensorialidade, RV e RA pode significativamente melhorar a aprendizagem de Biologia Celular para estudantes com visão típica e com deficiência visual. Enquanto que o desenvolvimento de ferramentas de aprendizagem multissensoriais de baixo custo mostrou-se eficaz na promoção de um ambiente de aprendizagem mais equitativo, permitindo que um aluno tivesse acesso a conteúdos complexos de Biologia Celular de maneira interativa e personalizada, as soluções baseadas em RV e RA mostraram-se particularmente valiosas para a compreensão de conceitos abstratos, como a estrutura e o funcionamento celulares. Além disso, as estratégias implementadas não só facilitaram a inclusão de estudantes com deficiência visual, mas também promoveram uma aprendizagem mais dinâmica para todos os alunos, ao reconhecer a diversidade de formas de aprendizagem e ao proporcionar múltiplas opções de engajamento.

Este trabalho também reforça a importância de formar educadores capacitados para lidar com a diversidade, promovendo uma abordagem pedagógica mais sensível e adaptativa. A criação de ambientes educacionais inclusivos não só beneficia os estudantes com deficiência, mas também contribui para a construção de um ambiente acadêmico mais diverso e equitativo, que valoriza a potencialidade de todos os alunos. Em última análise, este estudo reafirma o compromisso com a inclusão, demonstrando que, quando adequadamente implementadas, as estratégias de acessibilidade podem transformar o ensino superior em um espaço mais justo e igualitário para todos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, Swati. When molecules come to life – Using Augmented reality for studying protein structure in Cell Biology class. *The FASEB Journal*, v. 36, n. S1, 13 maio 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1096/fasebj.2022.36.S1.L7980>>.
- AGRELLO, Marisa Pascarelli; IMPAGLIAZZO, Marianina; ESCOLA, Joaquim José. Ensino das Ciências Imerso em Ambientes Virtuais Multiusuários. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, v. 20, p. 345–351, 29 dez. 2019.
- AL-ANSI, Abdullah M. et al. Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education. *Social Sciences & Humanities Open*, v. 8, n. 1, p. 100532, 2023.
- ALBERTS, Bruce et al. *Biologia Molecular da Célula*. 6ª Edição ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- AL-RAWI, Ismail. Teaching methodology and its effects on quality learning. *Journal of Education and Practice*, v. 4, n. 6, p. 100–105, 2013.
- ALVES, Luiza Destefani; MOCROSKY, Luciane Ferreira. Contribuições da perspectiva montessoriana para o ensino da matemática: o olhar voltado ao vivido com crianças atípicas. *ACTIO: Docência em Ciências*, v. 7, n. 3, p. 1–18, 2022.
- ARAÚJO-JORGE, Tania C. et al. Microscopy Images as Interactive Tools in Cell Modeling and Cell Biology Education. *Cell Biology Education*, v. 3, n. 2, p. 99–110, jun. 2004. Disponível em: <<https://www.lifescied.org/doi/10.1187/cbe.03-08-0010>>.
- AZUMA, R. et al. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 21, n. 6, p. 34–47, 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/963459/>>.
- BARBOSA, Jonei Cerqueira; OLIVEIRA, Andreia Maria Pereira. Why design research in Mathematics Education? *Perspectivas da Educação Matemática*, v. 8, n. 18, p. 526–546, 2015.
- BAUMGARTNER, Eric et al. Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, v. 32, n. 1, p. 5–8, 1 jan. 2003.
- BEAULIEU, Elaine; PETIT-TURCOTTE, Caroline. Gamification of learning in an introductory cell biology class. *The FASEB Journal*, v. 32, n. S1, abr. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1096/fasebj.2018.32.1_supplement.535.35>.
- BENNETT, Jennifer A.; SAUNDERS, Colin P. A Virtual Tour of the Cell: Impact of Virtual Reality on Student Learning and Engagement in the STEM Classroom. *Journal of*

- Microbiology & Biology Education*, v. 20, n. 2, jan. 2019. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/jmbe.v20i2.1658>>.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular - Ensino Médio. Documento homologado pela Portaria nº 1.570, publicada no D.O.U. de 21/12/2017, Seção 1, Pág. 146.* . Brasília, DF: [s.n.], 2018
- BRASIL. *Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015 - Lei de Inclusão de Pessoas com Deficiência.* . Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm>. , 2015
- BRASIL. *Lei nº 13.409, de 28 de dezembro de 2016 - Altera a Lei nº 12.711, de 29 de agosto de 2012, para dispor sobre a reserva de vagas para pessoas com deficiência nos cursos técnico de nível médio e superior das instituições federais de ensino.* . Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13409.htm>. Acesso em: 11 fev. 2025. , 2016
- BRASIL. *Política Nacional de Educação Especial na Perspectiva da Educação Inclusiva - Documento elaborado pelo Grupo de Trabalho nomeado pela Portaria Ministerial nº 555, de 5 de junho de 2007, prorrogada pela Portaria nº 948, de 09 de outubro de 2007.* . Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seesp/arquivos/pdf/politica.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2025. , 2008
- BRASIL. *Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012 - Aprova as diretrizes e normas regulamentadoras de pesquisas envolvendo seres humanos.* . Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/cns/2013/res0466_12_12_2012.html>. Acesso em: 19 mar. 2025. , 2012
- BUDDE, Priya Prakash; WILLIAMS, Elizabeth H.; MISTELI, Tom. Cell biology: At the center of modern biomedicine. *Journal of Cell Biology*, v. 199, n. 1, p. 7–8, 1 out. 2012. Disponível em: <<https://rupress.org/jcb/article/199/1/7/37170/Cell-biology-At-the-center-of-modern-biomedicine>>.
- CALDEIRA, Victor Lucas; FERREIRA, Hugo Silva. Relato de experiência e prática docente trabalhando a integração educacional de alunos cegos. *Boletim Técnico do Senac*, v. 46, n. 3, p. 6–16, 14 maio 2021. Disponível em: <<https://www.bts.senac.br/bts/article/view/853>>.
- CARMIGNIANI, Julie *et al.* Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, v. 51, n. 1, p. 341–377, 14 jan. 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11042-010-0660-6>>.
- CASTRO, Helena Carla. Inclusive Education: a brief look on inclusive education, blindness, educational resources and the biological area. *Revista Práxis*, v. 7, n. 13, 2

- out. 2015. Disponível em: <<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/praxis/article/view/641>>.
- CHAKER, Rawad *et al.* User experience of a 3D interactive human anatomy learning tool. *Journal of Educational Technology & Society*, v. 24, n. 2, p. 136–150, 2021.
- CHARLTON, James. *Nothing About Us Without Us: Disability Oppression and Empowerment*. [S.l.]: University of California Press, 1998.
- CIPRESSO, Pietro *et al.* The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, v. 9, 6 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2018.02086/full>>.
- CORRÊA, Giovana Camila Garcia; CAMPOS, Isabel Cristina Pires De; ALMAGRO, Ricardo Campanha. Research-action: a practical approach to qualitative research. *Ensaio Pedagógicos (Sorocaba)*, v. 2, n. 1, p. 62–72, 2018.
- CROFT, Emma. Experiences of Visually Impaired and Blind Students in UK Higher Education: An Exploration of Access and Participation. *Scandinavian Journal of Disability Research*, v. 22, n. 1, p. 382–392, 23 dez. 2020. Disponível em: <<http://www.sjdr.se/articles/10.16993/sjdr.721/>>.
- DALL’SOTO, Milena Mantelli *et al.* Building a site focused on Cell and Tissue Biology education. 2018, São Paulo: Brazilian Society for Cell Biology, 2018.
- DE BYL, Penny. Making Web3D Less Scary: Toward Easy-to-Use Web3D e-Learning Content Development Tools for Educators. *Innovate: Journal of Online Education*, v. 5, n. 5, 2009.
- DOGRUER, Nazan; EYYAM, Ramadan; MENEVIS, Ipek. The use of the internet for educational purposes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 28, p. 606–611, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042811025547>>.
- DUARTE, Ana Carolina Oliveira; SANTOS, Lívia Cristina. Uso de modelos tridimensionais no ensino superior nas disciplinas de embriologia, citologia, genética e biologia molecular. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 12, p. e590111235215, 25 set. 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/35215>>.
- DUDA, Hilarius Jago; ADPRIYADI, Adpriyadi. Students’ Misconception in Concept of Biology Cel. *Anatolian Journal of Education*, v. 5, n. 1, p. 47–52, 1 abr. 2020. Disponível em: <http://www.e-aje.net/images/dosyalar/aje_2020_1_5.pdf>.
- ENGLUND, Claire; OLOFSSON, Anders D.; PRICE, Linda. Teaching with technology in higher education: understanding conceptual change and development in practice. *Higher Education Research & Development*, v. 36, n. 1, p. 73–87, 2 jan. 2017.

- Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07294360.2016.1171300>.
- ERTMER, Peggy A. *et al.* Teacher beliefs and technology integration practices: A critical relationship. *Computers & Education*, v. 59, n. 2, p. 423–435, set. 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360131512000437>.
- FERNÁNDEZ, Gabriela A. *et al.* Application of Didactic Strategies as Multisensory Teaching Tools in Organic Chemistry Practices for Students with Visual Disabilities. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 4, p. 691–696, 9 abr. 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.8b00816>.
- FINSTERER, Josef. Ptosis: Causes, Presentation, and Management. *Aesthetic Plastic Surgery*, v. 27, n. 3, p. 193–204, 1 jun. 2003. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00266-003-0127-5>.
- FREIRE, Paulo. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. 15ª Edição ed. São Paulo: Paz e Terra, 2000.
- FREIRE, Paulo. *Pedagogia do oprimido*. 18ª Edição ed. São Paulo: Paz e Terra, 1988.
- GHUGE, Ganesh Dnyandev. 3D Modelling: A Review. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, p. 614–623, 31 dez. 2023.
- GEHRING, Kathleen M.; EASTMAN, Deborah A. Information Fluency for Undergraduate Biology Majors: Applications of Inquiry-based Learning in a Developmental Biology Course. *CBE—Life Sciences Education*, v. 7, n. 1, p. 54–63, mar. 2008. Disponível em: <https://www.lifescied.org/doi/10.1187/cbe.07-10-0091>.
- GETZEL, Elizabeth Evans; THOMA, Colleen A. Experiences of College Students With Disabilities and the Importance of Self-Determination in Higher Education Settings. *Career Development for Exceptional Individuals*, v. 31, n. 2, p. 77–84, 2 ago. 2008. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0885728808317658>.
- GIGANTE, Michael A. Virtual Reality: Definitions, History and Applications. *Virtual Reality Systems*. Boston: Elsevier, 1993. p. 3–14. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780122277481500093>.
- GILSON, Christie L; DYMOND, Stacy K. Barriers impacting students with disabilities at a Hong Kong university. *Journal of Postsecondary Education and Disability*, v. 25, n. 2, p. 103–118, 2012.
- GIN, Logan E. *et al.* Is Active Learning Accessible? Exploring the Process of Providing Accommodations to Students with Disabilities. *CBE—Life Sciences Education*, v. 19, n. 4, p. es12, dez. 2020. Disponível em: <https://www.lifescied.org/doi/10.1187/cbe.20-03-0049>.

- GIURGIU, Luminita; GLIGOREA, Ilie. Responsive Web Design Techniques. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, v. 23, n. 3, p. 37–42, 27 jun. 2017.
- GUPTA, P. K. *Cell and Molecular Biology*. Revised ed. Meerut: Rastogi Publications, 2009.
- GURDON INSTITUTE. *The Cell Explorer*. Disponível em: <<https://scopegurdoninstitute.co.uk/digital-toolkit-1-investigate-the-cell-3d-model>>. Acesso em: 30 jun. 2024.
- HOOG, Tanner G. *et al.* Rapid deployment of smartphone-based augmented reality tools for field and online education in structural biology. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 48, n. 5, p. 448–451, 30 set. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bmb.21396>>.
- HU, Ridong; WU, Yi-Yong; SHIEH, Chich-Jen. Effects of Virtual Reality Integrated Creative Thinking Instruction on Students' Creative Thinking Abilities. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, v. 12, n. 3, 17 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.ejmste.com/article/effects-of-virtual-reality-integrated-creative-thinking-instruction-on-students-creative-thinking-4497>>.
- INEP - INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. *Censo da Educação Superior 2023 - Divulgação dos resultados*. . Brasília: [s.n.], 3 out. 2024. Disponível em: <https://download.inep.gov.br/educacao_superior/censo_superior/documentos/2023/apresentacao_censo_da_educacao_superior_2023.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- KANE, John; MAKUCH, Joseph R. An Overview of Electronic Publishing and Extensible Markup Language (XML). *Journal of Applied Communications*, v. 82, n. 2, 1 jun. 1998.
- KAUFFMAN, James M *et al.* Trends and Issues Involving Disabilities in Higher Education. *Trends in Higher Education*, v. 2, n. 1, p. 1–15, 23 dez. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2813-4346/2/1/1>>.
- KHAN, Arshia *et al.* Active Learning: Engaging Students To Maximize Learning In An Online Course. *The Electronic Journal of e-Learning*, v. 15, n. 2, p. 107–115, 2017. Disponível em: <<https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1141876.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2025.
- KIRNER, Claudio; KIRNER, Tereza Gonçalves. Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada. *Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências*. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Computação, 2011. p. 10–25.
- KNIESTEDT, Christoph; STAMPER, Robert. Visual acuity and its measurement. *Ophthalmology Clinics of North America*, v. 16, n. 2, p. 155–170, jun. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0896154903000130>>.

- KOLPIKOVA, Elena P.; CHEN, Derek C.; DOHERTY, Jennifer H. Does the Format of Preclass Reading Quizzes Matter? An Evaluation of Traditional and Gamified, Adaptive Preclass Reading Quizzes. *CBE—Life Sciences Education*, v. 18, n. 4, p. ar52, dez. 2019.
- KOUSER, Shazia; MAJID, Ishfaq. TECHNOLOGICAL TOOLS FOR ENHANCING TEACHING AND LEARNING PROCESS. *Towards Excellence*, p. 366–373, 31 mar. 2021. Disponível em: <<https://hrdc.gujaratuniversity.ac.in/Uploads/EJournalDetail/30/1045/33.pdf>>.
- LAZAROWITZ, Reuven; NAIM, Raphael. Learning the Cell Structures with Three-Dimensional Models: Students' Achievement by Methods, Type of School and Questions' Cognitive Level. *Journal of Science Education and Technology*, v. 22, n. 4, p. 500–508, 29 ago. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10956-012-9409-5>>.
- LIBÂNEO, José Carlos. *Didática. Prática educativa, Pedagogia e Didática*. São Paulo: Cortez, 1994.
- LINTANGSARI, Alies Poetri; EMALIANA, Ive. Inclusive education services for the blind: Values, roles, and challenges of university EFL teachers. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, v. 9, n. 2, p. 439, 1 jun. 2020. Disponível em: <<http://ijere.iaescore.com/index.php/IJERE/article/view/20436>>.
- LOBO, Alex Sander Miranda; MAIA, Luiz Claudio Gomes. O uso das TICs como ferramenta de ensino-aprendizagem no Ensino Superior / Use of technologies of information and knowledge as teaching-learning tools in higher education. *Caderno de Geografia*, v. 25, n. 44, p. 16–26, 30 jul. 2015. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/9056>>.
- LOVE, Tyler S. *et al.* STEM Faculty Experiences with Students with Disabilities at a Land Grant Institution. *Journal of Education and Training Studies*, v. 3, n. 1, p. 27–38, 8 dez. 2014. Disponível em: <<http://redfame.com/journal/index.php/jets/article/view/573>>.
- MACHADO, Mosiah Heydrich *et al.* Morphologists and designers as allies exploring strategies to contribute to education on Cell Biology, Histology and Anatomy. 2018, São Paulo: XIX Congress of the Brazilian Society for Cell Biology, 2018.
- MANTOVANI, Ana Laura Sandoval *et al.* Cell biology and histology in medicine: perception on education and student performance. *International Journal of Health Education*, v. 3, n. 1, p. 8–16, 11 maio 2019. Disponível em: <<https://www5.bahiana.edu.br/index.php/educacao/article/view/2099>>.
- MARSHAK, Laura *et al.* Exploring Barriers to College Student Use of Disability Services and Accommodations. *Journal of Postsecondary Education and Disability*, v. 22, p. 151–165, 1 jan. 2010.

- MARTINS, MARIA HELENA VENÂNCIO; MELO, FRANCISCO R. L. VIEIRA DE; MARTINS, CÁTIA. SERVIÇOS PARA ESTUDANTES COM DEFICIÊNCIA NAS UNIVERSIDADES: DIFICULDADES E DESAFIOS. *Educação em Revista*, v. 37, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-46982021000100159&tlng=pt>.
- MCKENNEY, Susan; REEVES, Thomas. *Conducting Educational Design Research*. London: Routledge, 2012.
- MENDONÇA, Carolina Rodrigues *et al.* Human Anatomy: Teaching–Learning Experience of a Support Teacher and a Student with Low Vision and Blindness. *Anatomical Sciences Education*, v. 14, n. 5, p. 682–692, 10 set. 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ase.2058>>.
- MICHELOTTI, Angela; LORETO, Elgion Lucio da Silva. Use of tattooous didactic models as methodology for the teaching of Cellular Biology in inclusive tours with visual disabilities. *Revista Contexto & Educação*, v. 34, n. 109, p. 150–169, 30 ago. 2019. Disponível em: <<https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/contextoeducacao/article/view/8686>>.
- MONERAT, Carlos Alberto Andrade; ROCHA, Marcelo Borges. Análise da percepção de estudantes de graduação da área da saúde sobre o tema Biologia Celular. *Revista de Ensino de Bioquímica*, v. 13, n. 1, p. 27, 30 jun. 2015. Disponível em: <<http://bioquimica.org.br/revista/ojs/index.php/REB/article/view/532>>.
- MONTESORI, Maria Tecla Artemisia. *The Montessori Method*. New York: Frederick A. Stokes Company, 1912.
- MORAN, José Manuel; MASETTO, Marcos Tarciso; BEHRENS, Marilda Aparecida. *Novas tecnologias e mediação pedagógica*. 21ª Edição ed. Campinas: Papirus, 2013.
- MORIE, Jacquelyn Ford. Inspiring the future: merging mass communication, art, entertainment and virtual environments. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, v. 28, n. 2, p. 135–138, maio 1994.
- MORO, Roberta Gerling; VILLANOVA BIASUZ, Maria Cristina. Produzindo experiências dentro de um ambiente virtual 3D: o uso do software SculptrVR. 24 nov. 2020, Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação - SBC, 24 nov. 2020. p. 179–188. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/wie/article/view/12610>>.
- MOURA, Joseane *et al.* Biologia/Genética: O ensino de biologia, com enfoque a genética, das escolas públicas no Brasil – breve relato e reflexão. *Semina: Ciências Biológicas e da Saúde*, v. 34, n. 2, p. 167, 19 dez. 2013. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/seminabio/article/view/13398>>.

- NAI. *NAI - Núcleo de Acessibilidade e Inclusão da UFMG*. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/nai/>>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- NAIPAL, Shivani; RAMPERSAD, Nishanee. A review of visual impairment. *African Vision and Eye Health*, v. 77, n. 1, 26 jan. 2018.
- NATURE. Celebrating 20 years of cell biology. *Nature Cell Biology*, v. 21, n. 1, p. 1–1, 2 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41556-018-0262-5>>.
- NEDUCOM. *NEDUCOM - Núcleo de Educação e Comunicação em Ciências da Vida*. Disponível em: <<https://sites.icb.ufmg.br/neducom/>>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- NELSON, W. James; HOSKING, C. Rose; ALVANIA, Rebecca. CellBio-X: celebrating the interface between Cell Biology and other disciplines. *Trends in Cell Biology*, v. 20, n. 12, p. 689–690, dez. 2010. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0962892410002126>>.
- NETTO, Antônio Valério; MACHADO, Liliane dos Santos; OLIVEIRA, Maria Cristina Ferreira De. *Realidade virtual: fundamentos e aplicações*. Florianópolis: Visual Books, 2002.
- OLIVEIRA, Yuri Bassi De et al. A importância do ensino e da pesquisa em biologia celular: uma revisão narrativa. *Revista Eletrônica Acervo Científico*, v. 42, p. e11174, 10 out. 2022. Disponível em: <<https://acervomais.com.br/index.php/cientifico/article/view/11174>>.
- PANDEY, R. K. Comparative Study of Adjustment of Visually Impaired Students. *Universal Journal of Educational Research*, v. 6, n. 11, p. 2562–2571, nov. 2018. Disponível em: <http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=7485>.
- PEREIRA, Rosamaria Reo et al. Students with Disabilities at the Federal University of Pará: Difficulties and Suggestions for Improvement. *Revista Brasileira de Educação Especial*, v. 26, n. 3, p. 387–402, jul. 2020.
- PIFFERO, Eliane et al. Active Methodologies and the teaching of Biology: challenges and possibilities in the new High School. *Revista Ensino & Pesquisa*, v. 18, n. 2, p. 48–63, 20 ago. 2020. Disponível em: <http://periodicos.unespar.edu.br/index.php/ensinoepesquisa/article/view/3568/pdf_123>.
- PLOMP, Tjeerd; NIEVEEN, Nienke. *An introduction to educational design research: Proceedings of the seminar conducted at the East China Normal University, Shanghai (Pr china), November 23-26, 2007*. 3. ed. Enschede: SLO, 2010.
- REIS, Juliardnas Rigamont Dos. *Simuladorem ambiente de realidade virtual para o ensino da membrana plasmática*. 2019. 1–162 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/13094>>. Acesso em: 18 mar. 2025.

- REYNAGA-PENÑA, Cristina G. A Microscopic World at the Touch: Learning Biology with Novel 2.5D and 3D Tactile Models. *Journal of Blindness Innovation and Research*, v. 5, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://nfb.org/images/nfb/publications/jbir/jbir15/jbir050103abs.html>>.
- RIBEIRO, Maria das Graças. Inclusão Sócio-Educacional no Ensino de Ciências Integra Alunos e Coloca a Célula ao Alcance da Mão. 2004, Belo Horizonte: [s.n.], 2004. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/congrext/Educa/Educa102.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- RIBEIRO, Maria das Graças. The Museum of Morphological Sciences: a different place at the Universidade Federal de Minas Gerais. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, v. 12, n. suppl, p. 339–340, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-59702005000400017&lng=pt&tlng=pt>.
- RUBAN, Lilia M. et al. The Differential Impact of Academic Self-Regulatory Methods on Academic Achievement Among University Students With and Without Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, v. 36, n. 3, p. 270–286, 18 maio 2003. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00222194030303600306>>.
- SALGADO, Mariana Teixeira Santos Figueiredo; GAUTÉRIO, Vanda Leci Bueno. A tecnologia digital potencializando o ensino de biologia celular: a utilização do blog aliado ao canva. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 42, p. 156, 25 jun. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/10982>>.
- SANT'ANNA, Nadir Francisca et al. Microscopia óptica e eletrônica para deficientes visuais. *Benjamin Constant*, n. Especial, 2016. Disponível em: <<https://revista.ibc.gov.br/index.php/BC/article/view/341>>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- SANTIAGO, Sônia Aparecida; CARVALHO, Hernandes Faustino De. Frailty in the Teaching of Meiosis. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 26, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132020000100220&tlng=pt>.
- SANTOS, Danielle Aparecida Nascimento Dos; SCHLÜNZEN, Elisa Tomoe Moriya; JUNIOR, Klaus Schlünzen. Teachers Training for the Use of Digital Technologies. *Universal Journal of Educational Research*, v. 4, n. 6, p. 1288–1297, jun. 2016. Disponível em: <http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=3799>.
- SELAU, Bento; DAMIANI, Magda Floriana; COSTAS, Fabiane Adela Tonetto. Blind students in higher education: what to do with possible obstacles? *Acta Scientiarum. Education*, v. 39, n. 4, p. 431, 1 set. 2017. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciEduc/article/view/28915>>.

- SEVERINO, Antônio Joaquim. *Metodologia do Trabalho Científico*. 23ª Edição ed. São Paulo: Cortez, 2007.
- SHARMA, Aakanksha Ankush. Introduction to HTML (Hyper Text Markup Language) - A Review Paper. *International Journal of Science and Research*, v. 7, n. 5, p. 1337–1339, 2018.
- SILVA, Alessandra Dias Costa; JÚNIOR, Ailton José Vinholi; GOBARA, S. Ensino de biologia celular por meio de modelos concretos: um estudo de caso no contexto da deficiência visual. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 14, p. 50–62, 2019. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:200072160>>.
- SILVA, Jailma Cruz Da; PIMENTEL, Adriana Miranda. Inclusão educacional da pessoa com deficiência visual no ensino superior. *Cadernos Brasileiros de Terapia Ocupacional*, v. 29, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2526-89102021000100309&tlng=pt>.
- SILVA, Renata Vinadé Da et al. 3D Printing as a promoter of Inclusive and Creative Education on Cell Biology. 2018, São Paulo: XIX Congress of the Brazilian Society for Cell Biology, 2018. p. 94. Disponível em: <<https://iweb04.itarget.com.br/itarget.com.br/newclients/sbbc-portal-2023/wp-content/uploads/2023/11/Livro-ResumosSBBBC2018.pdf>>.
- SIQUEIRA, Gisele Carvalho De et al. Digital Information and Communication Technologies (DICT), teacher training and Zoology content: a mapping in national publications within the scope of Science Teaching. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e617974496, 28 maio 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4496>>.
- SYAFRIAFDI, Non et al. The Tools of Mathematics Learning Based on Realistic Mathematics Education Approach in Elementary School to Improve Math Abilities. *Universal Journal of Educational Research*, v. 7, n. 7, p. 1532–1536, jul. 2019. Disponível em: <http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=8114>.
- TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson Augusto. *Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada*. . Porto Alegre: Editora SBC. , 2006
- TRACY, Claire B. et al. Why Students Struggle in Undergraduate Biology: Sources and Solutions. *CBE—Life Sciences Education*, v. 21, n. 3, set. 2022. Disponível em: <<https://www.lifescied.org/doi/10.1187/cbe.21-09-0289>>.
- TURHAN, Berk; GÜMÜŞ, Zeynep H. A Brave New World: Virtual Reality and Augmented Reality in Systems Biology. *Frontiers in Bioinformatics*, v. 2, p. 1–9, 6 abr. 2022.

- Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbinf.2022.873478/full>.
- UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, Scientific and Cultural Organization. *Towards universal access to higher education: international trends*. Paris: UNESCO, 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375686>. Acesso em: 16 mar. 2025.
- VALENTE, José Armando. Integração Currículo e Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação: a passagem do currículo da era do lápis e papel para o currículo da era digital. In: CAVALHERI, A; ENGERROFF, S. N.; SILVA, J. C (Org.). *As Novas Tecnologias e os Desafios para uma Educação Humanizadora*. 1. ed. Santa Maria: Biblos Editora, 2013. p. 113–132.
- VAN DEN AKKER, Jan *et al.* *Educational Design Research*. London: Routledge, 2006. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781134155651>.
- VASCONCELLOS, Celso dos Santos. *Planejamento: Projeto de Ensino Aprendizagem e Projeto Político-Pedagógico – elementos metodológicos para elaboração e realização*. 16ª Edição ed. São Paulo: Libertad, 2002.
- VENKATESAN, Mythreye *et al.* Virtual and augmented reality for biomedical applications. *Cell Reports Medicine*, v. 2, n. 7, p. 100348, jul. 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S266637912100197X>.
- VERASZTO, Estéfano Vizconde; VICENTE, Nathália Elisa Ferreira. Cell Biology teaching for blind students: a proposal for inclusion. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, v. 17, n. 2, p. 361–376, 15 jun. 2022. Disponível em: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/GDLA/article/view/16994>.
- VESELINOVSKA, Snezana Stavreva; GUDEVA, Liljana Koleva; DJOKIC, Milena. Applying appropriate methods for teaching cell biology. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 15, p. 2837–2842, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042811007452>.
- VINCE, John. *Introduction to Virtual Reality*. London: Springer London, 2004. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-386-2>.
- VOLTOLINI, Ana Graciela Mendes Fernandes da Fonseca. Digital tools and the school: study of a pedagogical proposal. *Revista Observatório*, v. 5, n. 3, p. 293–316, 1 maio 2019. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/observatorio/article/view/5776>.
- VYGOTSKY, Lev Semyonovich. *Fundamentos de Defectologia (Obras Completas, Tomo 5)*. Cascavel: EDUNIOESTE - Editora da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2022.

WEBER, Carolyn F. Beyond the Cell: Using Multiscalar Topics to Bring Interdisciplinarity into Undergraduate Cellular Biology Courses. *CBE—Life Sciences Education*, v. 15, n. 2, p. es1, jun. 2016. Disponível em: <<https://www.lifescied.org/doi/10.1187/cbe.15-11-0234>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Global Initiative for the Elimination of Avoidable Blindness : action plan 2006-2011*. . [S.l.]: World Health Organization. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/43754/9789241595889_eng.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025. , 2007

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *ICD-11 for mortality and morbidity statistics*. Disponível em: <<https://icd.who.int/browse/2025-01/mms/en#1103667651>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (ALUNO PARTICIPANTE)

Em atendimento à Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde/Ministério da Saúde

Seção 1: Apresentação do projeto e esclarecimentos iniciais

Caro(a) aluno(a),

Você está sendo convidado(a) para participar, voluntariamente, do Projeto de Pesquisa intitulado “DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE BIOLOGIA CELULAR BASEADAS EM MULTISSENSORIALIDADE, REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA PARA ALUNOS COM VISÃO TÍPICA E COM DEFICIÊNCIA VISUAL NO ENSINO SUPERIOR”.

Está sendo convidado(a) também para participar do processo de validação do site "Citossina: Ferramentas de Ensino de Citologia", desenvolvido durante o Doutorado em Biologia Celular de Júlio Panzera Gonçalves. O referido site apresenta modelos 3D representativos de organelas, estruturas e processos celulares incluídos em ambientes de RV que permitem sua livre manipulação. Adicionalmente, alguns desses modelos foram otimizados para utilização em ambientes de RA.

Após receber os esclarecimentos e as informações a seguir, e no caso de aceitar fazer parte do estudo, assine o presente Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) em duas vias de igual teor. Uma delas ficará em sua posse e a outra ficará na posse do pesquisador responsável. Caso você opte por não participar do estudo, sua recusa não ocasionará prejuízo ou penalidade de qualquer natureza.

Para obter informações adicionais, entre em contato com os responsáveis pela pesquisa por meio dos seguintes telefones e e-mails profissionais:

- **Júlio Panzera Gonçalves (doutorando):**

E-mail: juliopanzera@ufmg.br

- **Cleida Aparecida de Oliveira (orientadora):**

E-mail: cleida@icb.ufmg.br

- **Endereço profissional dos responsáveis:**

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Presidente Antônio Carlos, nº 6627 - Instituto de Ciências Biológicas (ICB), Departamento de Morfologia, Sala 175, Bloco O3 – Pampulha, CEP: 31.270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Seção 2: Das atividades do projeto

Neste trabalho buscamos desenvolver e aplicar ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular baseadas em multissensorialidade, RV e RA para alunos com visão típica e com deficiência visual no ensino superior. Ao longo da realização deste projeto você participará das seguintes atividades:

- 1) Inscrição, visita e navegação em site da internet com ferramentas didáticas para o ensino de Biologia Celular.
- 2) Utilização, manipulação orientada e livre e estudo de representações 3D de organelas e estruturas celulares.
- 3) Utilização, livre e orientada de outras ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular contidas no referido site.
- 4) Realização de atividades diagnósticas, que consistem em responder questionários com afirmativas verdadeiras ou falsas sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular.
- 5) Utilização em suas rotinas de estudo, além das referências bibliográficas disponibilizadas na ementa da disciplina Biologia Celular, diferentes ferramentas digitais de ensino presentes no site supracitado.
- 6) Participação em discussões, reflexões e aulas dialogadas sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular.
- 7) Preenchimento de questionário no qual poderá expressar opinião sobre sua participação, conteúdo e relevância do estudo apresentado.

As atividades relacionadas acima ocorrerão durante as aulas de Biologia Celular em salas de aula localizadas no Instituto de Ciências Biológicas e no Centro de Atividades Didáticas de Ciências Naturais (CAD) da UFMG.

Seção 3: Da proteção de seus dados e de outros aspectos éticos

O presente estudo atende às normas estabelecidas na Resolução 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e respeita os critérios éticos necessários para implementar pesquisas que envolvem seres humanos (BRASIL, 2012). Por meio da Plataforma Brasil, o projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG.

A formalização de sua participação no projeto ocorrerá apenas mediante assinatura deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

Sua participação é voluntária e sua identidade será preservada. Dados pessoais como seu nome, idade, curso em que está matriculado e seus resultados em testes e avaliações poderão ser coletados. Estes e outros dados poderão ser analisados e utilizados para nortear discussões. Tais desdobramentos e outros achados poderão gerar publicações científicas, as quais não incluirão sua identidade e seus dados. Garantimos o sigilo destas e de outras informações confidenciais coletadas.

Além da garantia de que seus dados serão mantidos em sigilo, os mesmos serão desvinculados de sua propriedade durante tratamento e análise. Todos os dados coletados serão plotados em uma planilha armazenada em computador de uso exclusivo do Professor-pesquisador. Em seguida, lhe será atribuído um código alfanumérico pelo qual você passará a ser identificado. Este código não incluirá informações ou caracteres que possam associá-lo a você e será utilizado para lhe identificar durante as análises. Suas opiniões acerca das ferramentas de ensino-aprendizagem podem ser emitidas de forma anônima. Caso você se identifique ao emitir opiniões, as íntegras das mesmas serão catalogadas, mas desvinculadas de você de forma semelhante à dos seus dados pessoais, com geração de código alfanumérico.

A sua participação no projeto não acarretará qualquer tipo de despesas. Você também não receberá nenhum tipo de pagamento ou gratificação financeira pela sua participação.

Todos os dados coletados no decorrer deste estudo ficarão armazenados nos arquivos do autor do projeto por cinco anos. Vias do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, questionários, testes, avaliações, opiniões e outros documentos físicos serão mantidos em arquivos nas dependências do Laboratório de Biologia da Reprodução (LABRE) da UFMG. Planilhas e outros documentos digitais serão armazenados em computador de uso exclusivo do projeto.

Seção 4: Dos riscos de sua participação

Conforme a Resolução nº 466/2012, quaisquer pesquisas podem gerar riscos. Entretanto, os potenciais riscos aos quais você estará exposto ao participar deste projeto de pesquisa são mínimos. Você poderá se sentir desconfortável ou constrangido ao responder questionários que envolvam manifestar sua opinião. Com intuito de minimizar tais constrangimentos, você poderá respondê-los anonimamente. Estes e outros possíveis desconfortos ou constrangimentos devem ser comunicados ao Professor-pesquisador para que sejam sanados em comum acordo com você. Reiteramos que você tem toda liberdade de se recusar a participar do presente estudo. Além disso, a retirada de seu consentimento de participação poderá ser realizada em qualquer fase da pesquisa, sem penalização alguma e sem prejuízo ao seu cuidado.

Em caso de dúvidas éticas e para informar ocorrências irregulares ou danosas durante sua participação neste estudo, dirija-se ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627. Unidade Administrativa II – 2º andar – Sala 2005. Campus Pampulha Belo Horizonte, MG – Brasil de segunda-feira à sexta-feira das 09:00 às 11:00 horas e das 14:00 às 16:00 horas. Telefone: (31) 3409-4592. E-mail: coep@prpq.ufmg.br.

Seção 5: Dos benefícios de sua participação

Ainda de acordo com a Resolução nº 466/2012, a realização de projetos de pesquisa prevê a geração de benefícios para o ser humano, para a comunidade na qual está inserido e para a sociedade, os quais poderão continuar tendo efeitos mesmo após a conclusão do projeto. Os possíveis benefícios decorrentes deste estudo incluem incremento na qualidade dos índices acadêmicos dos estudantes proveniente da eficácia das ferramentas do projeto, além da viabilização de novas metodologias e oportunidades de ensino para a comunidade acadêmica.

Seção 6: Do seu consentimento

Eu, _____ abaixo assinado, concordo em participar do estudo descrito acima. Fui devidamente informado(a) e esclarecido(a) pelo pesquisador Júlio Panzera Gonçalves sobre a pesquisa, os procedimentos nela envolvidos, assim como os possíveis riscos e benefícios, caso existam, decorrentes de minha participação. Foi-me garantido que posso retirar meu consentimento a qualquer momento, sem que isto leve a qualquer penalidade. Conforme explicitado neste Termo, minha participação neste projeto prevê a coleta de meus dados pessoais e opiniões, assim como o acesso e a utilização de meus resultados em testes e avaliações acadêmicos durante o semestre letivo. Autorizo, de forma consciente, o acesso a tais informações, as quais serão mantidas em sigilo, mas poderão ser analisadas e utilizadas para nortear discussões e publicações científicas.

Belo Horizonte, _____ de _____ de _____.

_____ Assinatura ou impressão datiloscópica do(a) voluntário(a)	_____ Assinatura do Professor-pesquisador responsável pelo estudo
---	---

APÊNDICE B - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (PROFESSOR PARTICIPANTE)

Em atendimento à Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde/Ministério da Saúde

Seção 1: Apresentação do projeto e esclarecimentos iniciais

Prezado(a) professor(a),

Você está sendo convidado(a) para participar, voluntariamente, do Projeto de Pesquisa intitulado “DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE BIOLOGIA CELULAR BASEADAS EM MULTISSENSORIALIDADE, REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA PARA ALUNOS COM VISÃO TÍPICA E COM DEFICIÊNCIA VISUAL NO ENSINO SUPERIOR”.

Está sendo convidado(a) também para participar do processo de validação do site "Citossina: Ferramentas de Ensino de Citologia", desenvolvido durante o Doutorado em Biologia Celular de Júlio Panzera Gonçalves. O referido site apresenta modelos 3D representativos de organelas, estruturas e processos celulares incluídos em ambientes de RV que permitem sua livre manipulação. Adicionalmente, alguns desses modelos foram otimizados para utilização em ambientes de RA.

Cientes do aumento de estudantes com deficiência visual matriculados em cursos das áreas da saúde e biológicas, e da necessidade de implementarmos oportunidades de aprendizagem inclusiva, dotamos as ferramentas de recursos de acessibilidade (audiodescrições e interface de alteração de cores dos modelos 3D).

Além de inclusão, por meio dessas ferramentas procuramos diminuir a escassez de materiais didáticos para ensino de Biologia Celular baseados em tecnologias digitais, assim como fornecer alternativas de aprendizagem que superem as limitações impostas pelos livros didáticos tradicionais, os quais frequentemente não trazem representações 3D de estruturas celulares mais próximas da realidade.

Pedimos que colabore com este projeto fornecendo críticas e sugestões acerca das ferramentas desenvolvidas. Acreditamos que, como professor de Biologia Celular, suas

percepções ajudarão a aprimorar o conteúdo, a abordagem e a aplicabilidade destas ferramentas.

Após receber os esclarecimentos e as informações a seguir, e no caso de aceitar fazer parte do estudo, assine o presente Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) em duas vias de igual teor. Uma delas ficará em sua posse e a outra ficará na posse do pesquisador responsável. Caso você opte por não participar do estudo, sua recusa não ocasionará prejuízo ou penalidade de qualquer natureza.

Para obter informações adicionais, entre em contato com os responsáveis pela pesquisa por meio dos seguintes telefones e e-mails profissionais:

- **Júlio Panzera Gonçalves (doutorando):**

E-mail: juliopanzera@ufmg.br

- **Cleida Aparecida de Oliveira (orientadora):**

E-mail: cleida@icb.ufmg.br

- **Endereço profissional dos responsáveis:**

Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Presidente Antônio Carlos, nº 6627 - Instituto de Ciências Biológicas (ICB), Departamento de Morfologia, Sala 175, Bloco O3 – Pampulha, CEP: 31.270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Seção 2: Das atividades do projeto

Neste trabalho buscamos desenvolver e aplicar ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular baseadas em multissensorialidade, RV e RA para alunos com visão típica e com deficiência visual no ensino superior. Ao longo da realização deste projeto você participará de algumas atividades:

- 1) Inscrição, visita e navegação em site da internet com ferramentas didáticas para o ensino de Biologia Celular.
- 2) Utilização, manipulação orientada e livre e estudo de representações 3D de organelas e estruturas celulares.

- 3) Utilização, livre e orientada de outras ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular contidas no referido site.
- 4) Realização de atividades diagnósticas, que consistem em responder questionários com afirmativas verdadeiras ou falsas sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular.
- 5) Utilização das ferramentas de aprendizagem contidas durante suas aulas de Biologia Celular, além das referências bibliográficas disponibilizadas na ementa da disciplina Biologia Celular.
- 6) Preenchimento de questionário no qual poderá expressar opinião sobre sua participação, conteúdo e relevância do estudo apresentado.

As atividades relacionadas acima ocorrerão durante as aulas de Biologia Celular em salas de aula localizadas no Instituto de Ciências Biológicas e no Centro de Atividades Didáticas de Ciências Naturais (CAD) da UFMG.

Seção 3: Da proteção de seus dados e de outros aspectos éticos

O presente estudo atende às normas estabelecidas na Resolução 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e respeita os critérios éticos necessários para implementar pesquisas que envolvem seres humanos (BRASIL, 2012). Por meio da Plataforma Brasil, o projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG.

A formalização de sua participação no projeto ocorrerá apenas mediante assinatura deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

Sua participação é voluntária e sua identidade será preservada. Dados pessoais como seu nome, idade e cursos em que leciona Biologia Celular poderão ser coletados. Estes e outros dados poderão ser analisados e utilizados para nortear discussões. Tais desdobramentos e outros achados poderão gerar publicações científicas, as quais não incluirão sua identidade e seus dados. Garantimos o sigilo destas e de outras informações confidenciais coletadas.

Além da garantia de que seus dados serão mantidos em sigilo, os mesmos serão desvinculados de sua propriedade durante tratamento e análise. Todos os dados coletados serão plotados em uma planilha armazenada em computador de uso exclusivo do Professor-

pesquisador. Em seguida, lhe será atribuído um código alfanumérico pelo qual você passará a ser identificado. Este código não incluirá informações ou caracteres que possam associá-lo a você e será utilizado para lhe identificar durante as análises. Suas opiniões acerca das ferramentas de ensino-aprendizagem podem ser emitidas de forma anônima. Caso você se identifique ao emitir opiniões, as íntegras das mesmas serão catalogadas, mas desvinculadas de você de forma semelhante à dos seus dados pessoais, com geração de código alfanumérico.

A sua participação no projeto não acarretará qualquer tipo de despesas. Você também não receberá nenhum tipo de pagamento ou gratificação financeira pela sua participação.

Todos os dados coletados no decorrer deste estudo ficarão armazenados nos arquivos do autor do projeto por cinco anos. Vias do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, questionários, testes, avaliações, opiniões e outros documentos físicos serão mantidos em arquivos nas dependências do Laboratório de Biologia da Reprodução (LABRE) da UFMG. Planilhas e outros documentos digitais serão armazenados em computador de uso exclusivo do projeto.

Seção 4: Dos riscos de sua participação

Conforme a Resolução nº 466/2012, quaisquer pesquisas podem gerar riscos. Entretanto, os potenciais riscos aos quais você estará exposto ao participar deste projeto de pesquisa são mínimos. Você poderá se sentir desconfortável ou constrangido ao responder questionários que envolvam manifestar sua opinião. Com intuito de minimizar tais constrangimentos, você poderá respondê-los anonimamente. Estes e outros possíveis desconfortos ou constrangimentos devem ser comunicados ao Professor-pesquisador para que sejam sanados em comum acordo com você. Reiteramos que você tem toda liberdade de se recusar a participar do presente estudo. Além disso, a retirada de seu consentimento de participação poderá ser realizada em qualquer fase da pesquisa, sem penalização alguma e sem prejuízo ao seu cuidado.

Em caso de dúvidas éticas e para informar ocorrências irregulares ou danosas durante sua participação neste estudo, dirija-se ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627. Unidade Administrativa II – 2º andar – Sala 2005. Campus Pampulha Belo Horizonte, MG – Brasil de segunda-feira à sexta-

feira das 09:00 às 11:00 horas e das 14:00 às 16:00 horas. Telefone: (31) 3409-4592. E-mail: coep@prpq.ufmg.br.

Seção 5: Dos benefícios de sua participação

Ainda de acordo com a Resolução nº 466/2012, a realização de projetos de pesquisa prevê a geração de benefícios para o ser humano, para a comunidade na qual está inserido e para a sociedade, os quais poderão continuar tendo efeitos mesmo após a conclusão do projeto. Os possíveis benefícios decorrentes deste estudo incluem incremento na qualidade dos índices acadêmicos dos estudantes proveniente da eficácia das ferramentas do projeto, além da viabilização de novas metodologias e oportunidades de ensino para a comunidade acadêmica.

Seção 6: Do seu consentimento

Eu, _____ abaixo assinado, concordo em participar do estudo descrito acima. Fui devidamente informado(a) e esclarecido(a) pelo pesquisador Júlio Panzera Gonçalves sobre a pesquisa, os procedimentos nela envolvidos, assim como os possíveis riscos e benefícios, caso existam, decorrentes de minha participação. Foi-me garantido que posso retirar meu consentimento a qualquer momento, sem que isto leve a qualquer penalidade. Conforme explicitado neste Termo, minha participação neste projeto prevê a coleta de meus dados pessoais e opiniões. Autorizo, de forma consciente, o acesso a tais informações, as quais serão mantidas em sigilo, mas poderão ser analisadas e utilizadas para nortear discussões e publicações científicas.

Belo Horizonte, _____ de _____ de _____.

_____ Assinatura ou impressão datiloscópica do(a) voluntário(a)	_____ Assinatura do Professor-pesquisador responsável pelo estudo
---	---

**ANEXO A - PARECER CONSUBSTANCIADO DO COMITÊ DE ÉTICA
EM PESQUISA DA UFMG**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MINAS GERAIS



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: FERRAMENTAS INCLUSIVAS DE ENSINO-APRENDIZAGEM EM BIOLOGIA

Pesquisador: Cleida Aparecida de Oliveira

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 68680723.7.0000.5149

Instituição Proponente: PRO REITORIA DE PESQUISA

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 6.206.003

Apresentação do Projeto:

Segundo os autores do Estudo “A Biologia Celular se ocupa da investigação dos aspectos funcionais, morfológicos, comportamentais e bioquímicos das células, estruturas que correspondem à unidade básica da vida e que estão presentes em todos os organismos. Representa excitante e versátil área de pesquisa, que por meio de avanços na compreensão de processos essenciais, como divisão, adesão e migração celular, continuamente colabora para o progresso científico. No Brasil, o ensino da Biologia Celular é iniciado no ensino básico, mais precisamente durante o ensino médio. No ensino superior muitos dos conceitos introduzidos na etapa anterior são aprofundados, assim como outros são introduzidos. É sabido que a Biologia Celular é uma disciplina geralmente oferecida nos 5 períodos iniciais dos cursos de graduação, tendo em vista que é pré-requisito para completo aproveitamento de outras disciplinas como Histologia, Anatomia, Fisiologia, Imunologia, Patologia, dentre outras. É também frequentemente oferecida no primeiro período, momento de adaptação dos estudantes aos novos desafios do ambiente universitário”.

Os autores do Estudo relatam que “Ensinar Biologia Celular é bastante desafiador, uma vez que se trata do estudo de um universo microscópico onde não é possível a observação dos organismos unicelulares ou multicelulares a olho nu, havendo a necessidade do uso de equipamentos e ou de estratégias didáticas que possibilitem compreender a vida microscópica em sua complexidade e

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

dimensionamento tridimensional. Desta forma, tal fator reflete uma das maiores dificuldades encontrados nos processos de ensino e aprendizagem deste conteúdo, uma vez que, na maioria das vezes, os estudos se restringem ao uso de imagens de forma bidimensional e a análise de cortes histológicos analisados em diferentes microscopias, como a de luz e eletrônica, por exemplo, o que pouco retrata a compreensão de vida microscópica como ela é. Existe dos estudantes visualizar e traduzir mentalmente a célula e suas organelas de suas conformações bidimensionais para suas formas tridimensionais reais. Somados a isso, muitos termos e conceitos complexos e de difícil correlação, não assimilam adequadamente a cognição do mundo vivo e microscópico as estruturas microscópicas. Desta forma, um dos maiores desafios enfrentados pelos professores no ensino de Biologia é desenvolver nos estudantes a capacidade de coletar, analisar, aplicar e sintetizar informações, muitas das quais são necessárias para abstrair conceitos biológicos básicos e complexos. Com diferentes histórias pregressas, os estudantes alcançam as universidades com níveis de aprendizado distintos, fato que torna o ensino de Biologia Celular uma tarefa complexa. Muitos deles não estão familiarizados com imagens reais de células e são introduzidos à Biologia Celular por meio de desenhos e diagramas que não facilitam o entendimento sobre a estrutura ou a função celular. Ainda, não é incomum que estudantes se referiam à disciplina como complexa e permeada por termos e conceitos pouco familiares. É justamente essa complexidade dos temas que dificulta sua aceitação, principalmente quando atrelada à ausência de conhecimento prévio. Nesse sentido, fornecer representações palpáveis de estruturas microscópicas, muitas das quais não são completamente inteligíveis em representações bidimensionais presentes em livros didáticos ou mesmo nas visualizações ao microscópio, favorece o aprendizado ao permitir que os estudantes reflitam sobre como essas estruturas favorecem processos biomoleculares.

Adicionalmente, a falta de estrutura em muitas instituições de ensino, como disponibilidade de laboratórios com infraestrutura que permitam o desenvolvimento de práticas pedagógicas voltadas para o ensino de ciências também dificultam o processo de ensino e aprendizagem.

“Diante desse cenário, a presente proposta surgiu da necessidade de atualização das ferramentas e metodologias para o ensino e aprendizagem de Biologia Celular em cursos de nível superior, abrangendo as inclusivas. Segundo o Censo da Educação Superior, o número de alunos com deficiências regularmente matriculados em universidades brasileiras vem aumentando. Tal aumento é reflexo da aplicação de políticas públicas, muitas das quais abrangem desde o ensino básico e procuram garantir o acesso destes indivíduos às instituições regulares, superando ideias

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

ultrapassadas de segregação e institucionalizando ações inclusivas no contexto educacional”.

Segundo os autores do Estudo, “em 2021, o número total de alunos com algum nível de deficiência matriculados saltou para 63.404, valor que representa 0,71% do total de matrículas. Dentre os indivíduos deficientes matriculados, 3.482 declararam ser 100% deficientes visuais e 20.172 declararam ter baixa visão. Ainda que compreenda uma vitória, o crescimento do número de alunos com deficiência na educação superior, entre eles os deficientes visuais, impõe novos desafios, uma vez que o processo de inclusão não está completamente consolidado nas instituições universitárias. Se corretamente estimulado e inserido em um ambiente educacional promissor, o deficiente demonstrará melhora em sua capacidade de aprendizagem. Deficientes visuais frequentemente se utilizam de outros sentidos, como a audição e o tato para aprender. A abordagem multissensorial, cuja proposta é combinar sentidos, vem se mostrando ainda mais eficiente que metodologias tradicionais de ensino, pois aumenta a capacidade de adquirir e assimilar informações. Em diferentes etapas educacionais, a multissensorialidade permite que tanto alunos com deficiência visual quanto os normovisuais se aproveitem das mesmas situações para aprender. Ao invés de adaptar as metodologias vigentes aos alunos deficientes, processo que inadvertidamente poderia gerar lacunas nas interações entre eles e seus colegas, a combinação dos sentidos permite criar novas oportunidades de aprendizado sem necessidade de adaptação. No campo das Ciências Biológicas, o uso exclusivo de modelos táteis pode tornar a aprendizagem limitada, mesmo que essa técnica seja importante para criar imagens mentais das estruturas celulares. Logo, além de materiais táteis, é importante fornecer bibliografia em braile e outros recursos didáticos adaptados aos deficientes visuais, uma vez que sua escassez é motivo frequente de abandono da graduação por parte destes estudantes”.

Os estudantes contemporâneos estão bastante acostumados com o contexto tecnológico e não se adaptam mais aos ambientes de aprendizagem passivos. Frequentemente se vem diante de aulas com escassa abordagem prática e que abrangem apenas o modelo tradicional de ensino, o que provoca queda em suas expectativas para com o curso. Num cenário em que quadro e giz não são mais suficientes e diante da complexidade dos temas abordados em Biologia Celular, os quais dificultam a consolidação do aprendizado, faz-se necessária a busca por aplicação de novas estratégias pedagógicas.

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

Objetivo da Pesquisa:

Os autores da pesquisa delinearão a seguinte HIPÓTESE para o desenvolvimento da mesma:

“Este trabalho justifica-se pela necessidade de atualizar as metodologias de ensino em cursos de graduação das áreas da saúde e das Ciências Biológicas, para que se utilizem cada vez mais dos constantes avanços tecnológicos contemporâneos. Além disso, ele oportuniza o desenvolvimento de alternativas pedagógicas que contemplem alunos deficientes visuais, integrando-os aos seus pares e mestres nos cursos de graduação e oferecendo oportunidades de aprendizagem inclusiva que fomentem seu pleno desenvolvimento e sua permanência no curso.

Seguindo essa tendência, o projeto aqui descrito é um dos primeiros a propor a integração de tecnologias de realidade virtual, aumentada e multissensorialidade para oportunizar novas abordagens metodológicas para o ensino de Biologia Celular em cursos de graduação. Este estudo é uma pesquisa-ação. A questão problema que norteia essa pesquisa indaga se Ferramentas de ensino-aprendizagem baseadas em realidades virtual e aumentada e multissensorialidade impactam o aprendizado inclusivo de alunos normovisuais e deficientes na disciplina de Biologia Celular no ensino superior?

Ao estudar, desenvolver e aprimorar ferramentas didáticas de baixo custo e de fácil reprodução, o autor pretende responder essa questão, fomentar a discussão e a implementação de novas metodologias de aprendizagem para o ensino superior, na área de Biologia Celular, concretizar oportunidades de inclusão e compartilhamento das experiências adquiridas no percurso, oferecendo alternativas que visem alcançar o objetivo universal que é difundir o conhecimento científico.

Objetivo da Pesquisa:

Objetivo Primário:

Desenvolver e aplicar ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular baseadas nas realidades virtual e aumentada e multissensorialidade para alunos normovisuais e deficientes visuais no ensino superior.

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

Objetivos Secundários:

- Desenvolver um site onde possam ser implementadas e integradas as ferramentas de ensino-aprendizagem propostas;
- Construir objetos tridimensionais representativos da célula e sua organização subcelular, por meio de modelagem digital;
- Construir ferramentas de realidade aumentada no contexto da célula e suas organelas;
- Construir jogo tridimensional no contexto da célula e suas organelas;
- Confeccionar modelos de aprendizagem multissensorial com enfoque em Biologia Celular;
- Aplicar as ferramentas de ensino-aprendizagem desenvolvidas, visando sua validação como facilitadoras do processo de ensino-aprendizagem de Biologia Celular;
- Compartilhar as experiências adquiridas com o desenvolvimento e aplicação das ferramentas propostas com os pares.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Segundo os autores da Pesquisa quanto aos RISCOS “Existem alguns riscos, mas são mínimos: alunos participantes que por ventura se sentirem desconfortáveis respondendo aos questionários propostos poderão comunicar suas insatisfações ao Professor-pesquisador, para que sejam sanadas. A participação nas atividades ocorrerá apenas mediante assinatura TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TALE). A recusa em participar do estudo não acarretará prejuízo de qualquer natureza”.

E quanto aos BENEFÍCIOS do Estudo os autores destacam:

“Ter conhecimento da estrutura celular e de conceitos básicos e avançados de Biologia Celular. Uma vez comprovada a eficácia e corrigidas possíveis imperfeições, a comunidade acadêmica terá acesso às ferramentas desenvolvidas, como recurso didático, com o intuito de melhoria da

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

qualidade de ensino e promoção do protagonismo dos alunos”.

Outro Benefício da Pesquisa destacado pelos autores inclui a “Produção de uma sequência didática, juntamente com análise crítica sobre a abordagem proposta, visando disseminar essa prática para a comunidade acadêmica local e externa”.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Pesquisa interessante e bastante relevante para a área de Educação e de Ciências Biológicas.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de atualizar as metodologias de ensino em cursos de graduação das áreas da saúde e das Ciências Biológicas, para que se utilizem cada vez mais dos constantes avanços tecnológicos contemporâneos. Além disso, ele irá oportunizar o desenvolvimento de alternativas pedagógicas que contemplem alunos deficientes visuais, integrando-os aos seus pares e mestres nos cursos de graduação e oferecendo oportunidades de aprendizagem inclusiva que fomentem seu pleno desenvolvimento e sua permanência no curso. O desenvolvimento e aplicação das ferramentas e técnicas de aprendizagem que se aproveitam de recursos digitais e metodologias ativas seguem uma tendência mundial de ampliação do uso de recursos interativos e tecnológicos para o ensino nos diversos níveis, incluindo em universidades. Experiências bem-sucedidas demonstram o potencial de diferentes tecnologias digitais para o enriquecimento dos processos educativos. Seguindo essa tendência, o projeto aqui descrito é um dos primeiros a propor a integração de tecnologias de realidade virtual, aumentada e multissensorialidade para oportunizar novas abordagens metodológicas para o ensino de Biologia Celular em cursos de graduação. Este estudo é uma pesquisa-ação. Tais projetos se caracterizam por ter dois objetivos fundamentais: o objetivo prático, voltado para o levantamento de soluções para o objeto de estudo, e o objetivo de conhecimento, que intenciona ampliar as fronteiras científicas (Corrêa et al., 2018). Severino (2007) argumenta que além de compreender a situação, a pesquisa-ação intenciona modificá-la, realizando um diagnóstico que permita aos atores modificar suas práticas. A questão problema que norteia essa pesquisa indaga se Ferramentas de ensino-aprendizagem baseadas em realidades virtual e aumentada e multissensorialidade impactam o aprendizado inclusivo de alunos normovisuais e deficientes na disciplina de Biologia Celular no ensino superior? Ao estudar, desenvolver e aprimorar ferramentas didáticas de baixo custo e de fácil reprodução, o autor pretende responder essa questão, fomentar a discussão e a implementação de novas metodologias de aprendizagem para o ensino superior, na área de

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

Biologia Celular, concretizar oportunidades de inclusão e compartilhamento das experiências adquiridas no percurso, oferecendo alternativas que visem alcançar o objetivo universal que é difundir o conhecimento científico.

O presente Projeto de Pesquisa se propõe a desenvolver ferramentas de ensino-aprendizagem de Biologia Celular baseadas nas realidades virtual e aumentada e multissensorialidade para alunos normovisuais e deficientes visuais. A partir de tais ferramentas espera-se fomentar a discussão e a implementação de novas metodologias de aprendizagem para o ensino superior e compartilhar as experiências adquiridas no percurso, oferecendo alternativas que visem alcançar o objetivo universal que é difundir o conhecimento científico.

Após o desenvolvimento das ferramentas de ensino-aprendizagem, 110 alunos que cursam as disciplinas de Biologia Celular e Metabólica (matriculados no curso de Terapia Ocupacional da UFMG) e Citologia-Histologia (matriculados no curso de Farmácia da UFMG) oferecidas no Departamento de Morfologia do ICB, UFMG, serão convidados a participar da Pesquisa por meio da “Aplicação das ferramentas de ensino-aprendizagem” desenvolvidas no presente Projeto de Doutorado, que serão aplicadas como atividades em sala de aula no decorrer das disciplinas de Biologia de Celular e Metabólica e Citologia e Histologia, obedecendo as ementas dos respectivos cursos e priorizando a criação de oportunidades de aprendizagem compatíveis com os princípios éticos e institucionais necessários à graduação.

Além disso, para aplicação das ferramentas didáticas inclusivas “serão captados alunos deficientes visuais vinculados ao Núcleo de Acessibilidade e Inclusão (NAI) e devidamente matriculados em curso de graduação da área da saúde da UFMG”.

Ao longo da etapa de “Aplicação das ferramentas de ensino-aprendizagem”, os alunos participantes estarão envolvidos nas seguintes atividades:

- 1) Inscrição, visita e navegação em site da internet com ferramentas didáticas para o ensino de Biologia Celular.
- 2) Utilização, manipulação orientada e livre e estudo de representações tridimensionais de organelas e estruturas celulares.
- 3) Realização de atividades diagnósticas, que consistem em responder questionários com afirmativas verdadeiras ou falsas sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular.

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II **CEP:** 31.270-901

UF: MG **Município:** BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

- 4) Utilização em suas rotinas de estudo, além das referências bibliográficas disponibilizadas na ementa da disciplina Biologia Celular, diferentes ferramentas digitais de ensino presentes no site supracitado.
- 5) Participação em discussões, reflexões e aulas dialogadas sobre conceitos básicos e avançados de Biologia Celular.
- 6) Preenchimento de questionário semiestruturado no qual poderá expressar opinião sobre sua participação, conteúdo e relevância do estudo apresentado.

Na nova versão do Projeto apresentada na Plataforma Brasil foram acrescentadas todas as recomendações solicitadas no Parecer No 6.064.830 emitido pelo CEP-UFGM em 17/05/2023, resumidamente destacadas abaixo:

- acrescentar nos documentos do Projeto (Projeto detalhado do Pesquisador e Protocolo de Pesquisa da Plataforma Brasil), Informações sobre as 05 (cinco) Atividades que serão realizadas pelos Alunos participantes do Estudo, incluindo o Local, Dados Pessoais Requeridos e consulta aos Resultados e Testes Acadêmicos. Essa Recomendação foi atendida.

Na nova versão dos documentos foram acrescentadas Informações sobre o Local de realização, caracterização dos cursos de graduação e disciplinas nas quais serão realizadas as 06 (seis) atividades acima descritas no texto do Protocolo de Pesquisa da PB (seção de Metodologia proposta, página 4) e do Projeto Detalhado do Pesquisador (seção de Materiais e Métodos, página 21, seção 6.1.2 Aplicação de Ferramentas de Ensino-Aprendizagem).

- esclarecer nos documentos do Projeto (Projeto detalhado do Pesquisador, Protocolo da Plataforma Brasil) como seria feita a anonimização dos dados (pessoais, qualitativos e quantitativos) coletados dos alunos participantes do estudo. Recomendou-se no 1º Parecer ajustar o texto do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) sobre as medidas adotadas para a anonimização dos dados. Essa Recomendação foi atendida.

Na nova versão do Projeto Detalhado do Pesquisador na seção de Materiais e Métodos foi expandido o antigo item 6.1.4 Aspectos Éticos para o item 6.1.4 Aspectos Éticos e Coleta de Dados (página 23) que apresenta o detalhamento sobre os aspectos éticos previstos no estudo incluindo o Direito à não-participação na pesquisa, as medidas que serão tomadas para garantia do sigilo da identidade dos participantes, da anonimização dos dados, local, forma e tempo de

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

armazenamento dos dados, esclarecimentos sobre ausência de compensação financeira e os benefícios resultantes do estudos, entre outros importantes aspectos. Parte das informações descritas no documento Projeto Detalhado, item 6.1.4 Aspectos Éticos e Coleta de Dados (página 23) também é apresentada ao final da seção da Metodologia Proposta no documento Protocolo de Pesquisa da PB (página 4).

Registra-se que o texto do TCLE que será apresentado aos participantes do estudo sofreu revisão importante que contribuiu bastante à qualidade e à compreensão do estudo, sendo agora dividido em 06 seções, sendo que há agora uma seção que trata especificamente dos aspectos éticos do estudo, transcrita integralmente a seguir:

Seção 3: Da proteção de seus dados e de outros aspectos éticos

O presente estudo atende às normas estabelecidas na Resolução 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e respeita os critérios éticos necessários para implementar pesquisas que envolvem seres humanos (BRASIL, 2012). Por meio da Plataforma Brasil, o projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG. A formalização de sua participação no projeto ocorrerá apenas mediante assinatura deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Sua participação é voluntária e sua identidade será preservada. Dados pessoais como seu nome, idade, curso em que está matriculado e seus resultados em testes e avaliações poderão ser coletados. Estes e outros dados poderão ser analisados e utilizados para nortear discussões. Tais desdobramentos e outros achados poderão gerar publicações científicas, as quais não incluirão sua identidade e seus dados. Garantimos o sigilo destas e de outras informações confidenciais coletadas. Além da garantia de que seus dados serão mantidos em sigilo, os mesmos serão desvinculados de sua propriedade durante tratamento e análise. Todos os dados coletados serão plotados em uma planilha armazenada em computador de uso exclusivo do Professor-pesquisador. Em seguida, lhe será atribuído um código alfanumérico pelo qual você passará a ser identificado. Este código não incluirá informações ou caracteres que possam associá-lo a você e será utilizado para lhe identificar durante as análises. Suas opiniões acerca das ferramentas de ensino-aprendizagem podem ser emitidas de forma anônima. Caso você se identifique ao emitir opiniões, as íntegras das mesmas serão catalogadas, mas desvinculadas de você de forma semelhante à dos seus dados pessoais, com geração de código alfanumérico. A sua participação no projeto não acarretará qualquer tipo de despesas. Você também não receberá nenhum tipo de

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

pagamento ou gratificação financeira pela sua participação. Todos os dados coletados no decorrer deste estudo ficarão armazenados nos arquivos do autor do projeto por cinco anos. Vias do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, questionários, testes, avaliações, opiniões e outros documentos físicos serão mantidos em arquivos nas dependências do Laboratório de Biologia da Reprodução (LABRE) da UFMG. Planilhas e outros documentos digitais serão armazenados em computador de uso exclusivo do projeto.

- Recomendou-se no 1º Parecer a definição sobre o número total de alunos participantes no estudo e sobre o número de alunos que participaria das atividades de Aplicação de Questionários, entre outras intervenções. Essa recomendação foi atendida.

Registra-se que nos documentos do Projeto anexados à Plataforma Brasil (Projeto Detalhado do Pesquisador e no Protocolo Básico de Pesquisa) foi definido como o “Tamanho da Amostra no Brasil” (n= 110 participantes) e quanto ao “Número de Indivíduos recrutados e que serão submetidos a intervenções ...” ficou definido um n= 110 alunos. (Seção de Metodologia Proposta no Protocolo da PB, páginas 5 e 6). Um “n” amostral equivalente foi acrescentado no texto do Projeto Detalhado do Pesquisador (Seção de Materiais e Métodos, página 21).

- A questão da “Indenização” que estava presente no texto do TCLE da 1ª versão apresentada foi melhor esclarecida na versão revisada do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

- Sobre a questão da “Aplicação e Avaliação das ferramentas didáticas inclusivas” solicitou-se aos pesquisadores que incluíssem na Metodologia do Projeto (Detalhado e da PB) maiores detalhes sobre as condutas e medidas que seriam utilizadas para a abordagem, o acompanhamento e a avaliação dos “alunos deficientes visuais”. Essa recomendação foi atendida.

Na nova versão dos documentos acrescentados à Plataforma Brasil (Projeto Detalhado e Protocolo de Pesquisa) foi incluída entre as atividades que serão desenvolvidas pelos alunos participantes do estudo a Atividade 2:

2) Utilização, manipulação orientada e livre e estudo de representações tridimensionais de organelas e estruturas celulares.

Da mesma forma, na seção de Materiais e Métodos do Projeto Detalhado do Pesquisador (página

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

24) foi acrescentado um tópico inteiro sobre o desenvolvimento do NAI (Núcleo de Acessibilidade e Inclusão) da UFMG: como descrito abaixo:

O Núcleo de Acessibilidade e Inclusão (NAI) é fruto de iniciativas promovidas desde os anos 90 por várias entidades da UFMG, como o Centro de Apoio ao Deficiente Visual (CADV), o Grupo Interdisciplinar de Estudos sobre a Educação Inclusiva e Necessidades Educacionais Especiais (GEINE), o Laboratório Adaptse, o Museu de Ciências Morfológicas, o Núcleo de Libras, o Núcleo de Comunicação e Acessibilidade, o Programa Diálogos de Inclusão e o Grupo Paramec. No ano de 2014 o núcleo foi oficializado como referência no atendimento de alunos dos níveis fundamental, médio e técnico, de alunos de graduação e pós-graduação e de servidores da UFMG com necessidades educacionais especiais e com deficiência física, sensorial ou intelectual. Atualmente oferece serviços de proposição, organização, coordenação e execução de ações para assegurar a inclusão dessas pessoas à vida acadêmica e profissional (NAI, 2022). Tendo em vista a experiência do NAI em atender membros da comunidade acadêmica, o mesmo auxiliará na captação de voluntários com diferentes níveis de deficiência visual para colaboração no presente projeto. Estes voluntários estarão sujeitos às mesmas condições de participação que os demais voluntários, sendo necessário, portanto, esclarecimento das condições de inclusão no projeto e consentimento prévios, mediante assinatura ou impressão datiloscópica no Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Foram apresentados os seguintes documentos:

Projeto Detalhado (Brochura do Pesquisador), Protocolo Básico de Pesquisa apresentado à Plataforma Brasil (PB), Parecer Consubstanciado da Câmara Departamental (aprovado em 17/03/2023), Folha de rosto, TCLE, Ofício de Aprovação do Projeto nas Instâncias Institucionais.

Destaca-se que o TCLE relativo ao Projeto de pesquisa a ser desenvolvido apresenta um texto bastante adequado no que diz respeito aos Objetivos, Metodologia da Pesquisa, Riscos e Benefícios, e Aspectos éticos observados.

Na presente versão do Projeto foi apresentada a Carta resposta da Coordenadora do Estudo, uma

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

versão revisada do TCLE, do Projeto Detalhado do Pesquisador e do Protocolo de Pesquisa da Plataforma Brasil.

Recomendações:

Tendo sido atendidas todas as recomendações do Parecer No 6.064.830 emitido pelo CEP-UFMG em 17/05/2023, sou a favor, S.M.J., pela Aprovação do presente Projeto de pesquisa.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Não há.

Considerações Finais a critério do CEP:

Tendo em vista a legislação vigente (Resolução CNS 466/12), o CEP-UFMG recomenda aos Pesquisadores: comunicar toda e qualquer alteração do projeto e do termo de consentimento via emenda na Plataforma Brasil, informar imediatamente qualquer evento adverso ocorrido durante o desenvolvimento da pesquisa (via documental encaminhada em papel), apresentar na forma de notificação relatórios parciais do andamento do mesmo a cada 06 (seis) meses e ao término da pesquisa encaminhar a este Comitê um sumário dos resultados do projeto (relatório final).

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2089588.pdf	29/05/2023 14:10:59		Aceito
Outros	Carta_Resposta.pdf	29/05/2023 14:09:44	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE.pdf	29/05/2023 14:08:58	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Detalhado.pdf	29/05/2023 14:08:47	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
Parecer Anterior	Parecer_Consubstanciado.pdf	11/04/2023 15:49:04	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
Cronograma	identificacao_do_projeto.pdf	06/04/2023 13:20:13	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
Declaração de concordância	oficio.PDF	06/04/2023 13:19:03	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito
Folha de Rosto	folha_de_rosto.pdf	06/04/2023 13:15:30	JULIO PANZERA GONCALVES	Aceito

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II

CEP: 31.270-901

UF: MG

Município: BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MINAS GERAIS



Continuação do Parecer: 6.206.003

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

BELO HORIZONTE, 28 de Julho de 2023

Assinado por:
Corinne Davis Rodrigues
(Coordenador(a))

Endereço: Av. Presidente Antonio Carlos, 6627 2º. Andar Sala 2005 Campus Pampulha

Bairro: Unidade Administrativa II **CEP:** 31.270-901

UF: MG **Município:** BELO HORIZONTE

Telefone: (31)3409-4592

E-mail: coep@prpq.ufmg.br