

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Herramienta de visualización de grafos para la exploración de relaciones
causa-efecto en un contexto de resiliencia climática

TECH-391

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera/o en Ciencias de la Computación

Presentado por:

Danae Jacqueline Townsend Hinostroza

Ronald Xavier Cabrera Palacios

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Más allá de agradecer a mi familia, a “Pastelitos” y Phycom por darme todo lo necesario y siempre creer en mí, quiero honrar a las versiones de mí que me trajeron hasta aquí: A mi yo de 6 años, que escribió en una computadora por primera vez. De 15 años, que descubrió comandos de Windows y Linux. De 16, que buscó cursos de programación. De 18, que eligió computación entre muchas opciones. De 21, que saltó a un país nuevo para cumplir su sueño de intercambio. De 23, que no se rindió hasta lograrlo. Esto no es el final, sino el comienzo de algo aún más grande.

Danaé J. Townsend H.

A mis padres, porque siempre han sido mis guías desde que era pequeño y me han sabido aconsejar, apoyar y amar en cada etapa de mi vida. A mis hermanos, por ser las personas que me inspiran a ser mejor cada día. A mis amigos de la infancia, Christopher, Javier, Joffre, Steven y Xavier, porque siempre han estado ahí para cuando necesitaba su ayuda. A Danaé, Rommel, Gustavo, Melanie y demás miembros de “Pastelitos”, que hicieron este camino por la ESPOL mucho más agradable.

Ronald X. Cabrera P.

Agradecimientos

A los "Pastelitos" y a Ronald Cabrera, mis aliados en este viaje, quienes con ideas y apoyo académico convirtieron este proyecto en realidad. A la profesora Ana Tapia, faro en mi camino, que con paciencia de madre me guió en este mundo nuevo. Y a ESPOL, mi cuna de oportunidades, donde cada aprendizaje ha sido un paso hacia lo grande.

Danaé J. Townsend H.

Agradezco mucho a la colaboración de las profesoras Ana Tapia y Marisol Villacrés, quienes nos supieron guiar durante estos meses. A Mercy Borbor y sus equipos de trabajo, que nos prestaron su tiempo para el desarrollo del proyecto. Y a Danaé Townsend, por haber sido una excelente compañera en este camino.

Ronald X. Cabrera P.

Declaración Expresa

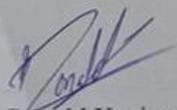
Nosotros, Ronald Xavier Cabrera Palacios y Danaé Jacqueline Townsend Hinostroza, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

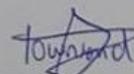
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.



Ronald Xavier
Cabrera Palacios



Danaé Jacqueline
Townsend Hinostroza

Evaluadores

PhD. Lucia Villacrés Falconí

Profesor de Materia

PhD. Ana Teresa Tapia Rosero

Tutor de Proyecto

Resumen

El presente trabajo forma parte del proyecto Clim-Red, orientado a la gestión del cambio climático mediante estrategias resilientes. Tiene como objetivo general desarrollar una herramienta de software que administre grafos para facilitar la gestión de relaciones causa-efecto en el contexto del cambio climático apoyando la toma de decisiones en adaptación y mitigación climática. La propuesta se justifica en la necesidad de entender y visualizar las interdependencias complejas que caracterizan las dinámicas climáticas, ofreciendo una solución accesible tanto para la comunidad científica como para la ciudadanía. Para su desarrollo, se diseñó un sistema basado en teoría de grafos y principios de usabilidad, empleando herramientas computacionales avanzadas y normas de diseño centrado en el usuario. Se implementó un sistema dinámico que permite actualizar diagramas y validar reglas mediante la interacción de expertos, lo que garantiza precisión técnica y adaptabilidad a diferentes escenarios climáticos. Los resultados demostraron que la herramienta facilita la comprensión de relaciones causa-efecto complejas, promoviendo la colaboración interdisciplinaria y mejorando la claridad visual en la representación de datos. Además, las pruebas realizadas con expertos validaron su eficacia en términos de usabilidad y precisión en el modelado de dinámicas climáticas.

Palabras Clave: Gestión climática, teoría de grafos, cambio climático, usabilidad, software.

Abstract

This work is part of the Clim-Red project, aimed at managing climate change through resilient strategies. The general objective of this work is to develop a software tool that manages graphs to facilitate the understanding of cause-effect relationships within the context of climate change, supporting decision-making in adaptation and mitigation efforts. The proposal is justified by the need to understand and visualize the complex interdependencies that characterize climate dynamics offering an accessible solution for both the scientific community and the general public. For its development, a system based on graph theory and usability principles was designed, employing advanced computational tools and user-centered design standards. A dynamic system was implemented to enable diagram updates and rule validation through expert interaction, ensuring technical precision and adaptability to diverse climate scenarios. The results demonstrated that the tool enhances the understanding of complex cause-effect relationships, promoting interdisciplinary collaboration and improving visual clarity in data representation. Additionally, tests conducted with experts validated its effectiveness in terms of usability and accuracy in modeling climate dynamics.

Keywords: Climate management, graph theory, climate change, usability, software.

Índice general

Evaluadores	5
Resumen	6
<i>Abstract</i>	7
Índice general	8
Abreviaturas	12
Simbología	13
Índice de figuras	14
Índice de tablas	14
Capítulo 1	17
Introducción	17
1.2 Descripción del problema	17
1.3 Justificación del problema	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	20
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	20
1.5 Marco teórico	21
1.5.1 Definición del cambio climático y su importancia	21
1.5.2 El marco DPSIR	22
1.5.3 Modelación de relaciones causa-efecto mediante teoría de grafos	23
1.5.4 Formalización de reglas computacionales a partir de modelos basados en grafos	24
1.5.5 Interfaces de usuario y visualización de datos	26
Capítulo 2	27
2. Metodología	27
2.1 Usuarios	28
2.1.1 Investigadores científicos	28
2.1.2 Actores comunitarios	28
2.2 Historias de usuario	28

2.3	Requerimientos funcionales	31
2.3.1	Funcionalidades básicas del manejo de diagramas DPSIR.....	31
2.3.2	Manejo de control de versiones en los diagramas	32
2.3.3	Creación y uso de reglas de interacción.....	32
2.3.4	Interacción accesible para explorar las relaciones causales	32
2.4	Requerimientos no funcionales.....	33
2.4.1	Usabilidad	33
2.4.2	Rendimiento	33
2.4.3	Escalabilidad	34
2.4.4	Seguridad	34
2.4.5	Mantenibilidad	34
2.4.6	Accesibilidad	34
2.4.7	Compatibilidad.....	35
2.4.8	Experiencia de usuario	35
2.5	Riesgos y beneficios de la solución	35
2.5.1	Riesgos	35
2.5.2	Beneficios	35
2.6	Principios de diseño	36
2.6.1	Manejo de componentes en el diagrama	36
2.6.2	Manejo de control de versiones en los diagramas	37
2.6.3	Creación y uso de reglas de interacción.....	37
2.6.4	Interacción accesible para explorar las relaciones complejas dentro del diagrama	37
2.7	Prototipado.....	37
2.7.1	Dashboard de organización.....	38
2.7.2	Gestión de grupos, secciones y componentes	39
2.7.3	Gestión de reglas	41
2.7.4	Creación de reportes y validación de reglas	43
2.7.5	Gestión de versiones	43

2.8	Evaluación	44
2.8.1	Participantes	44
2.8.2	Aspectos por evaluar.....	45
2.9	Arquitectura de la solución.....	47
2.9.1	Arquitectura lógica	47
2.9.2	Vista de procesos.....	48
2.9.3	Vista de desarrollo.....	53
2.10	Diseño de la base de datos.....	54
2.10.1	Diseño de base de datos no relacional:	55
2.10.2	Diseño de base de datos relacional	57
Capítulo 3	61
3.1	Plan de implementación.....	61
3.2	Tiempo de desarrollo.....	61
3.3	Uso de servicios externos y costos	62
3.4	Requisitos mínimos y compatibilidad.....	62
3.5	Pruebas	63
3.5.1	Objetivos.....	63
3.5.2	Planificación	64
3.5.3	Reclutamiento de voluntarios.....	64
3.5.4	Estrategia y lugar de reclutamiento.....	64
3.5.5	Grupo de tareas	64
3.5.6	Ejemplo de preguntas para cuestionario de usabilidad	66
2.6	Resultados.....	67
2.6.1	Grupo actores comunitarios	67
2.6.2	Grupo investigadores científicos	72
2.6.2.1	Precisión en validar y relacionar componentes.....	73
2.6.2.2	Creación de grafos y generación de nuevas versiones	73
2.6.3	Descubrimientos generales de la encuesta de usabilidad	73

Capítulo 4	75
4.1 Conclusiones y recomendaciones	75
4.1.1 Conclusiones	75
4.1.2 Recomendaciones	77
Referencias.....	78
Apéndice A	83
Apéndice B	85
Apéndice C	88
Apéndice D	90
Apéndice E	92
Apéndice F.....	93

Abreviaturas

API	Interfaz de Programación de Aplicaciones
DPSIR	Fuerzas Impulsoras, Presiones, Estado, Impacto, Respuestas
CCPA	Ley de Privacidad del Consumidor
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones sobre el Cambio Climático
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GB	Gigabyte
GDPR	Reglamento General de Protección de Datos
HTTP	Protocolo de Transferencia de Hipertexto
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
JSON	Java Script Object Notation
MB	Megabyte
MBPS	Megabits Por Segundo
ONU	Organización de las Naciones Unidas
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio
RDF	Marco de Descripción de Recursos
WCAG	Pautas de Accesibilidad para el Contenido Web

Simbología

CO² Dióxido de Carbono

Min Minutos

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diagrama DPSIR. Adaptado de (Kristensen, 2004)</i>	22
Figura 2 <i>Diagrama de la metodología</i>	27
Figura 3 <i>Dashboard del prototipo</i>	38
Figura 4 <i>Ventana de creación de diagrama</i>	39
Figura 5 <i>Diagrama base en un prototipo de ejemplo</i>	39
Figura 6 <i>Creación de una nueva sección en un prototipo de ejemplo</i>	40
Figura 7 <i>Creación de un componente en un prototipo de ejemplo</i>	41
Figura 8 <i>Creación de una regla en un prototipo de ejemplo</i>	42
Figura 9 <i>Gestión de una regla en un prototipo de ejemplo</i>	42
Figura 10 <i>Arquitectura lógica de la herramienta Link-graph</i>	47
Figura 11 <i>Vista de procesos de la herramienta.</i>	50
Figura 12 <i>Vista de desarrollo de la herramienta</i>	53
Figura 13 <i>Diseño de la base de datos no relacional</i>	56
Figura 14 <i>Diseño de la base de datos relacional</i>	58
Figura 15 <i>Matriz de operacionalización de las funcionalidades más destacadas</i>	69
Figura 16 <i>Ejemplo básico de creación de un sistema causa-efecto</i>	70
Figura 17 <i>Ejemplos de reportes obtenidos de las pruebas</i>	71
Figura 18 <i>Aspectos de valoración en los reportes</i>	72
Figura 19 <i>Detalle de puntuación de las principales dificultades reportadas</i>	74

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Historia de usuario AG - 0010</i>	29
Tabla 2 <i>Historia de usuario AG - 0020</i>	29
Tabla 3 <i>Historia de usuario AG - 0030</i>	29
Tabla 4 <i>Historia de usuario AG - 0040</i>	30
Tabla 5 <i>Historia de usuario AG - 0050</i>	30
Tabla 6 <i>Evaluación de la satisfacción del usuario</i>	45
Tabla 7 <i>Evaluación del impacto educativo</i>	45
Tabla 8 <i>Evaluación de la usabilidad y eficiencia</i>	46
Tabla 9 <i>Evaluación de la generación de reportes de reglas para científicos</i>	46
Tabla 10 <i>Descripción de los componentes en la arquitectura lógica</i>	47
Tabla 11 <i>Cronograma de desarrollo por área</i>	61

Tabla 12	<i>Servicios externos utilizados y sus planes</i>	62
Tabla 13	<i>Requisitos mínimos y compatibilidad</i>	63
Tabla 14	<i>Preguntas de ejemplo del cuestionario de usabilidad</i>	67
Tabla 15	<i>Tiempo promedio para completar tareas del grupo actores comunitarios</i>	67
Tabla 16	<i>Tiempo promedio para completar tareas del grupo investigadores científicos</i>	72
Tabla 17	<i>Historia de usuario FT-001</i>	85
Tabla 18	<i>Historia de usuario FT-002</i>	85
Tabla 19	<i>Historia de usuario FT-003</i>	86
Tabla 20	<i>Historia de usuario FT-004</i>	86

CAPÍTULO 1

Introducción

1.2 Descripción del problema

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha enfatizado la importancia de comunicar eficazmente el cambio climático mediante el uso de información científica confiable, la transmisión clara del problema y sus soluciones, y la movilización de la acción (Marta Ferreira, 2024).

El cambio climático se manifiesta a través de una compleja red de interacciones entre variables críticas, como las emisiones de gases de efecto invernadero, la deforestación, el aumento del nivel del mar y las temperaturas globales, además de considerar variables ambientales, económicas y sociales. Estas variables no solo están interconectadas, sino que también se afectan mutuamente a través de relaciones de causa y efecto, lo que complica aún más la comprensión de sus dinámicas (Press, 2021). Esta interrelación crea un sistema en el que cada cambio puede desencadenar efectos en múltiples áreas, haciendo que abordar el cambio climático sea un desafío multifacético.

Es así como (Cravero A. S., 2020) menciona que el cambio climático se configura como un sistema complejo debido a la interacción de múltiples variables que se influyen mutuamente en una red de relaciones causa-efecto. A través de estudios y modelos avanzados, los científicos ayudan a prever el impacto del cambio climático en diferentes escenarios, lo cual es esencial para desarrollar políticas locales y globales efectivas. Sin embargo, a pesar de la abundante información disponible, estos expertos se enfrentan a la dificultad de predecir cómo se manifestará el cambio climático a nivel local y qué medidas serán efectivas (Cravero A. a., 2020).

Comprender estas interacciones es crucial para la toma de decisiones informadas y la formulación de políticas efectivas, ya que estas dependen de un análisis riguroso que permita evaluar los riesgos y las oportunidades. Solo a través de un análisis detallado de estos factores se pueden identificar puntos de intervención óptimos y estrategias de mitigación, como lo plantean

Steffen et al., quienes subrayan la complejidad del sistema terrestre y la necesidad de un enfoque integrado en las decisiones climáticas (Rockström & Richardson, 2023). Además, investigaciones recientes han destacado la importancia de las interacciones global-local-global para desarrollar medidas de adaptación más resilientes y políticas de mitigación más eficaces (Baldos et al., 2023).

Las medidas de adaptación se refieren a los ajustes en sistemas ecológicos, sociales o económicos en respuesta a estímulos climáticos reales o previstos y sus efectos o impactos. Estas medidas implican cambios en procesos, prácticas y estructuras para moderar los daños potenciales o aprovechar oportunidades asociadas con el cambio climático al promover estrategias integrales basadas en evidencia (Piers M. Forster, 2023), como lo resalta también la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Mientras que las medidas de mitigación se centran en intervenciones humanas que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero o mejorar los sumideros de estos gases, abarcando acciones como la reducción de fuentes emisoras y el fortalecimiento de la capacidad de absorción de carbono de los ecosistemas, tal como lo indica el último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC);(Boncheva, 2013).

Esta situación subraya la necesidad urgente de soluciones que permitan visualizar y actualizar las relaciones de causa y efecto, facilitando una comprensión más profunda del problema y promoviendo una acción climática coordinada en todos los niveles.

Los científicos desempeñan un rol clave al interpretar datos climáticos y validar modelos predictivos para proyectar escenarios futuros (Piers M. Forster, 2023). Paralelamente, la comunidad contribuye mediante la implementación de medidas de adaptación y mitigación, integrando conocimientos locales y tradicionales que aportan perspectivas únicas para la gestión sostenible de recursos (WRI). No obstante, estos saberes requieren validación científica para asegurar su eficacia en diversos contextos (IPCC, 2021).

En respuesta a esta problemática, se propone el proyecto Link-graph, enfocado en la creación, gestión y estructuración de grafos para el análisis de relaciones simples y complejas entre

variables, además de la gestión y creación de reglas entre estas relaciones de causa y efecto. Este enfoque busca facilitar el estudio de interacciones dinámicas y complejas, proporcionando una herramienta amigable y fácil para el análisis de sistemas interdependientes. Así, la herramienta no solo mejora la comprensión pública de estos procesos, sino que también fomenta la participación y el compromiso de la comunidad para enfrentar los retos del cambio climático de manera colectiva y coordinada.

1.3 Justificación del problema

La propuesta presentada en este documento forma parte del proyecto Clim-Red, orientado a la gestión del cambio climático mediante estrategias resilientes. Se plantea una plataforma interactiva que conecte a la comunidad y a los científicos, de una manera accesible para ambos usuarios, ofreciendo una solución innovadora para facilitar el entendimiento y abordar la complejidad de las relaciones causa-efecto inherentes al cambio climático, apoyándonos en el conocimiento empírico y teórico que estos actores aportan.

Dado que el cambio climático involucra una gran cantidad de variables interconectadas y relaciones de causa-efecto que impactan diferentes áreas del medio ambiente y la sociedad, la herramienta se enfoca en facilitar la visualización de estas interacciones. Esto se logra mediante el uso de teoría de grafos, el diseño de interfaces basadas en la interacción humano-computador, y la representación de reglas que describen adecuadamente las relaciones causa-efecto, alineándose con el conocimiento de la comunidad científica.

Este enfoque permite modelar redes que pueden ser complejas de interdependencias, al tiempo que proporciona mecanismos innovadores de análisis para los científicos, mejorando así la comprensión en diferentes niveles. Además, este sistema computacional proporcionará una interfaz práctica que apoyará tanto a expertos como a la ciudadanía en la visualización de estos procesos, promoviendo la conciencia pública y una acción coordinada frente a los desafíos climáticos.

La herramienta busca no solo ser una herramienta tecnológica, sino también un catalizador que fomente respuestas globales efectivas y alineadas con los principios de sostenibilidad y adaptación climática. Este proyecto busca a largo plazo convertirse en una base sólida para los procesos de toma de decisiones informadas, la adaptación de políticas y el desarrollo de estrategias proactivas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una herramienta de software que administre grafos para facilitar la gestión de relaciones causa-efecto en el contexto del cambio climático resiliente, mediante la actualización dinámica de diagramas y la generación de reglas. Esta herramienta apoyará la toma de decisiones orientadas a implementar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Diseñar una herramienta de software basada en grafos con interfaz intuitiva y centrada en el usuario, integrando principios de usabilidad y accesibilidad, para facilitar a la comunidad y científicos en la creación de diagramas de relaciones causa-efecto. Este diseño priorizará la claridad visual y la navegación asequible, con el propósito de eliminar barreras técnicas y fomentar la colaboración interdisciplinaria en el análisis de interacciones climáticas.
2. Implementar un sistema dinámico de gestión de relaciones causa-efecto mediante grafos computacionales, que permita la validación de reglas mediante ajustes por expertos, con el fin de mejorar la comprensión de las dinámicas climáticas y asegurar precisión técnica.
3. Evaluar la eficacia del software desarrollado mediante pruebas prácticas con expertos en cambio climático, utilizando métricas de diseño de software para medir cómo la herramienta mejora el nivel de comprensión de las interacciones entre variables climáticas.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Definición del cambio climático y su importancia

El cambio climático se define como una variación significativa y persistente en los patrones climáticos globales o regionales, causada tanto por procesos naturales como por actividades humanas. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), este fenómeno está estrechamente vinculado al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera debido a actividades como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y ciertas prácticas agrícolas (Jorge Herrera Murillo, 2017).

La importancia de estudiar el cambio climático radica en su capacidad de generar impactos profundos en los sistemas naturales y humanos, afectando factores críticos como la disponibilidad de recursos, la estabilidad económica y la seguridad social. Estos efectos incluyen cambios en los patrones meteorológicos, el aumento del nivel del mar y la degradación de ecosistemas, lo que subraya la necesidad de comprender sus causas y consecuencias para orientar estrategias de mitigación y adaptación (Olmedo, Valderrama, & González).

Sin embargo, el cambio climático no debe entenderse solo como un fenómeno aislado, sino como un sistema complejo compuesto por múltiples variables interconectadas. Estas variables interactúan de manera dinámica y no lineal, lo que significa que un cambio en una de ellas puede desencadenar efectos significativos en otras, generando retroalimentaciones que amplifican o moderan los impactos globales (U. Baldos, 2023). Este comportamiento no lineal dificulta la predicción precisa de los impactos del cambio climático y subraya la importancia de analizar las interacciones y retroalimentaciones dentro del sistema climático (R. Hansell). Comprender estas relaciones causa-efecto es fundamental para identificar puntos de intervención clave y diseñar estrategias más efectivas (R. Knutti, 2015).

1.5.2 El marco DPSIR

El marco DPSIR por su sigla en inglés, es una herramienta útil para representar estas relaciones de manera estructurada. Permite visualizar cómo las fuerzas impulsoras (Driving forces), como el crecimiento económico o el consumo energético, generan presiones (Pressures) sobre el medio ambiente como es el caso de las emisiones de CO₂, que a su vez modifican el estado (State) del sistema climático, por ejemplo el aumento de la temperatura. Estos cambios producen impactos (Impact) en ecosistemas y sociedades como la pérdida de biodiversidad, requiriendo respuestas (Responses) técnicas o políticas para mitigar o adaptarse a las consecuencias (Smeets, 1999).

Esta representación facilita la comprensión de las relaciones causa-efecto y ayuda a identificar puntos clave para intervenir (Gabrielsen, 2003).

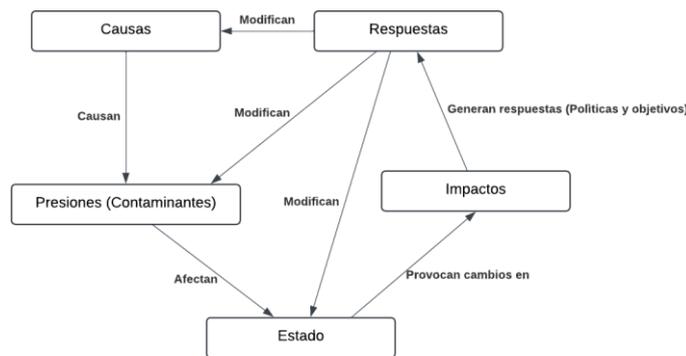


Figura 1 Diagrama DPSIR. Adaptado de (Kristensen, 2004)

Para abordar esta problemática, la Figura 1 Diagrama DPSIR. Adaptado de (Kristensen, 2004), desglosa el sistema en cinco componentes jerárquicos interconectados: Fuerzas Impulsoras, Presiones, Estado ambiental, Impactos y Respuestas.

Este marco no solo simplifica la visualización de relaciones no lineales, sino que también vincula acciones humanas con sus efectos ambientales. Por ejemplo, al analizar cómo una política de subsidios a energías renovables (Respuestas) reduce las presiones derivadas de combustibles fósiles, se evidencia la importancia de diseñar estrategias alineadas con cada eslabón del modelo (Barry Ness, 2010). La integración de datos cuantitativos, por ejemplo toneladas de CO₂ emitidas,

y cualitativos, por ejemplo participación comunitaria en el DPSIR permite, además, adaptar su aplicación a escalas locales o globales, potenciando su utilidad en la gestión climática basada en evidencia (Karen Tscherning, 2012). Comprender las relaciones causa-efecto entre las variables climáticas es crucial para formular políticas efectivas de mitigación y adaptación. Sin un análisis detallado de cómo interactúan estas variables, es difícil identificar los puntos de intervención más efectivos. Por ejemplo, las conexiones entre las estrategias de mitigación y adaptación, si se entienden adecuadamente, pueden mejorar significativamente los resultados de las políticas climáticas, reduciendo riesgos y costos (S. Kane).

1.5.3 Modelación de relaciones causa-efecto mediante teoría de grafos

La modelación de relaciones causa-efecto, como el cambio climático, exige herramientas analíticas capaces de capturar la multidimensionalidad de interacciones no lineales entre sus componentes. Es así como la teoría de grafos emerge como un marco metodológico robusto para representar estos sistemas mediante abstracciones matemáticas basadas en nodos (entidades discretas) y aristas (conexiones causales o funcionales). Su uso ha demostrado ser particularmente útil en las ciencias del clima para modelar patrones de interacción y estructuras subyacentes en sistemas climáticos, permitiendo comprender dinámicas como la propagación de impactos y la estabilidad del sistema (J. Phillips, 2015). En este sentido, la teoría de grafos, una rama de la matemática que estudia relaciones mediante nodos (entidades) y aristas (conexiones), ofrece un lenguaje formal para estructurar causalidades. Los nodos representan variables climáticas como la temperatura y las emisiones de CO₂, mientras que las aristas codifican relaciones causa-efecto, por ejemplo "las emisiones de CO₂ incrementan la temperatura global". Esta representación gráfica no solo simplifica la identificación de dependencias jerárquicas, sino que también permite aplicar algoritmos para detectar patrones críticos, como ciclos de retroalimentación positiva como el derretimiento de permafrost libera metano, lo que provoca un mayor calentamiento. O el análisis de caminos cortos entre componentes. Un ejemplo es el algoritmo de Dijkstra que puede identificar

la secuencia causal más directa entre un factor impulsor y un impacto final, optimizando la priorización de intervenciones (Lotfi, et al., 2021).

Aplicada al cambio climático, la teoría de grafos facilita el análisis de interacciones clave. Además de identificar nodos críticos, las técnicas como el cálculo de centralidad de intermediación conocida en inglés como *betweenness centrality*, revelan variables que actúan como puentes entre múltiples cadenas causales, como lo sería la acidificación oceánica que conecta presiones químicas con impactos biológicos (Tizghadam & Leon-Garcia, 2010). Agregando a lo anterior, el análisis de caminos mínimos ayuda a cuantificar cómo perturbaciones en un componente se propagan con mayor rapidez a través de ciertas rutas, permitiendo evaluar la resiliencia del sistema (Phillips, Schwanghart, & Heckmann, 2015). Estos enfoques, combinados con atributos ponderados en las aristas como lo sería la magnitud del impacto, permiten modelar escenarios donde se simula la eliminación o mitigación de nodos específicos, cuantificando su efecto en cascada sobre el sistema climático (Poulter, Goodall, & Halpin, 2008).

El modelado basado en grafos no solo estructura relaciones causa-efecto de manera comprensible, sino que también establece un marco para desarrollar reglas computacionales que formalicen estas interacciones. Estas reglas, fundamentadas en métricas de grafos como caminos cortos y centralidad, permiten analizar sistemas complejos y simular escenarios bajo diferentes políticas, ofreciendo una herramienta poderosa para entender y gestionar fenómenos climáticos y otros sistemas interconectados (Tizghadam & Leon-Garcia, 2010); (Lotfi, et al., 2021).

1.5.4 Formalización de reglas computacionales a partir de modelos basados en grafos

La generación de reglas computacionales a partir de grafos implica traducir relaciones causa-efecto, representadas en nodos y aristas, en estructuras lógicas que describan el comportamiento del sistema. Estas reglas se formalizan mediante métodos como sistemas condicionales (if-else) o colocaciones semánticas, permitiendo modelar interacciones climáticas de manera programática. Por ejemplo, una regla podría expresarse como: "Si la concentración de

CO₂ supera X ppm (nodo), entonces se activa un impacto en la acidificación oceánica (arista) con probabilidad Y [peso]" (Korff, 2005). Este enfoque automatiza la identificación de relaciones críticas, y establece un marco reproducible para evaluar escenarios bajo distintas condiciones iniciales.

Para garantizar la precisión de las reglas, se emplean técnicas computacionales basadas en la estructura y propiedades del grafo: las gramáticas formales proporcionan una sintaxis estructurada para expresar relaciones causa-efecto a través de reglas condicionales, como las basadas en lógica de predicados, lo que facilita la representación precisa de interacciones complejas (Hermann, et al., 2015). Además, las colocaciones estadísticas permiten identificar pares de variables que co-ocurren con alta frecuencia en el grafo, revelando patrones causales significativos, como la relación entre el aumento de temperatura y la reducción de glaciares (Alcalá, Casillas, Cordon, & Herrera, 2001). Del mismo modo, el análisis de caminos críticos, mediante algoritmos como Betweenness Centrality, identifica nodos clave que conectan múltiples cadenas causales, lo cual resulta esencial para priorizar intervenciones estratégicas (Tizghadam & Leon-Garcia, 2010). Por último, la lógica difusa modela la incertidumbre en las relaciones a través de pesos probabilísticos asignados a las aristas, como en casos donde existe un 70% de probabilidad de que la deforestación incremente las sequías (Andras Bardossy).

1.5.4.1 Métodos para la generación y validación de reglas

Entre los métodos clave para la generación de reglas computacionales destacan la extracción de subgrafos significativos, que identifica patrones recurrentes, como ciclos de retroalimentación, para derivar reglas generalizables (Korff, 2005). También, la inferencia basada en lógica formal emplea frameworks como RDF/OWL para traducir propiedades del grafo, como transitividad y simetría, en reglas ejecutables (Antoniou & Harmelen, 2004). Y la propagación de restricciones que aplica criterios espaciales o temporales para refinar reglas y adaptarlas a dinámicas específicas del sistema (Andras Bardossy).

La validación de estas reglas no es un proceso aislado, ya que requiere la colaboración activa de científicos expertos. Su conocimiento especializado resulta crucial para evaluar la relevancia de las relaciones establecidas, asegurando que los modelos no solo reflejen de manera adecuada la realidad climática, sino que también sean útiles en la planificación de políticas . Este enfoque colaborativo combina la precisión técnica de los métodos computacionales con el juicio contextualizado de los expertos, fortaleciendo tanto la aplicabilidad como la confiabilidad de las reglas generadas (Fildes & Kourentzes, 2011).

1.5.5 Interfaces de usuario y visualización de datos

El diseño de interfaces intuitivas es esencial para traducir relaciones causa-efecto climáticas en representaciones accesibles, especialmente para usuarios no expertos (Nocke, Flechsig, & Bohm, 2007). Estas interfaces integran herramientas como reportes interactivos y mapas de influencia que visualizan conexiones jerárquicas en marcos como DPSIR. Los reportes en formato tabular complementan estos gráficos, especificando relaciones cuantitativas y priorizando nodos críticos mediante métricas como centralidad o frecuencia de interacciones. Este enfoque híbrido —gráfico y tabular— permite explorar datos en múltiples niveles, desde patrones macro hasta detalles técnicos, facilitando una toma de decisiones basada en evidencia (Navarra, et al., 2021); (Maxwell, 2012).

Desde una dimensión social, la accesibilidad visual se erige como un puente entre el conocimiento técnico y la acción colectiva. Estas herramientas transforman datos abstractos en narrativas accionables, reforzando la comprensión de metas climáticas globales mediante la integración de datos cuantitativos y cualitativos (Zhang, Li, Liu, & Huang, 2016). Este enfoque multidimensional permite a legisladores y educadores identificar patrones y diseñar soluciones colaborativas basadas en datos estructurados. Así, la claridad visual y el detalle tabular convergen para impulsar políticas climáticas inclusivas, donde la transparencia de las relaciones fortalece la confianza pública (Nocke, Flechsig, & Bohm, 2007); (Steed, et al., 2014).

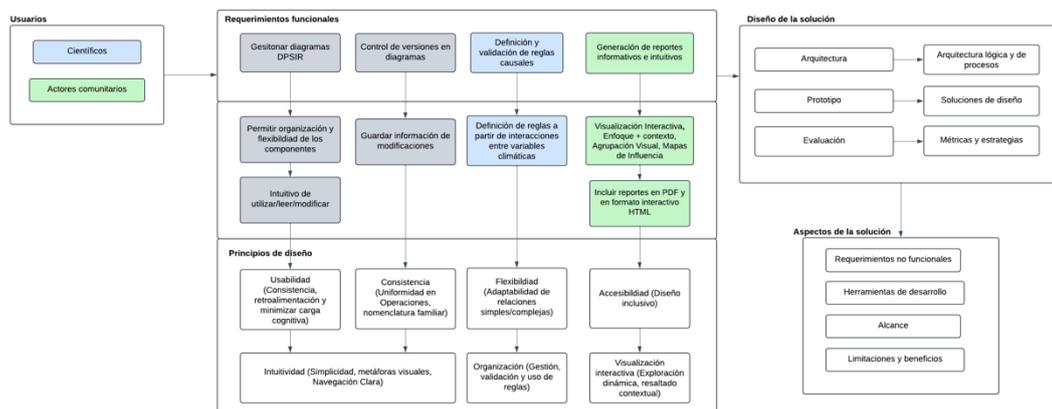
Capítulo 2

2. Metodología.

Para el desarrollo de la metodología de este proyecto, se llevaron a cabo reuniones entre actores asociados al proyecto y el tutor, quien fungió como enlace directo con el cliente. En estas sesiones, se definieron enfoques metodológicos, se priorizaron aspectos críticos para la construcción de la solución y se establecieron lineamientos estratégicos que guiaron su desarrollo integral.

La solución, llamada Link-graph, se planteó como herramienta de código abierto para gestionar diagramas DPSIR, enfocada en generar y validar reglas causales entre variables climáticas. Su diseño priorizó usabilidad e intuición, garantizando acceso equitativo para científicos y público general. Originalmente concebida para el análisis de resiliencia climática, la herramienta fue diseñada con capacidad de escalabilidad, permitiendo su adaptación a otros dominios que demanden modelado de relaciones causales.

Figura 2
Diagrama de la metodología



La metodología descrita en la **Error! Reference source not found.** detalla el flujo de desarrollo de la solución, centrado en los usuarios, integrando componentes clave como requisitos funcionales vinculados a principios de diseño, la arquitectura propuesta, el prototipo y una evaluación integral para validar su eficacia. Además, incorpora elementos complementarios,

incluyendo requisitos no funcionales, herramientas tecnológicas empleadas, alcance del proyecto, así como sus limitaciones y beneficios potenciales.

2.1 Usuarios

2.1.1 Investigadores científicos

Este grupo incluye a profesionales especializados como geólogos, vulcanólogos, ingenieros civiles, estadísticos y expertos en otras áreas científicas. Su objetivo principal es analizar las complejas relaciones entre variables climáticas. Utilizan la herramienta para visualizar interacciones mediante diagramas DPSIR, validar relaciones causa-efecto y generar reportes para respaldar sus estudios. Además, los científicos pueden modelar representaciones y verificar la precisión de los modelos con el propósito apoyar el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

2.1.2 Actores comunitarios

Este grupo, bajo el contexto del proyecto Clim-Red, está compuesto por diferentes actores de la comunidad, tales como agricultores, empresarios y emprendedores de sectores económicos como hotelería, turismo, gastronomía. También forman parte profesores y representantes de instituciones no gubernamentales o fundaciones ambientales. Estos usuarios buscan utilizar la plataforma para comprender de manera intuitiva cómo las acciones humanas afectan al cambio climático, visualizando las relaciones de causa-efecto y pensando en posibles estrategias de mitigación o adaptación.

2.2 Historias de usuario

De acuerdo con lo mencionado, se presentan a continuación las historias de usuario de mayor impacto en el diseño de la herramienta en desarrollo, mientras que los elementos faltantes, pueden consultarse en el Apéndice B.

Tabla 1*Historia de usuario AG - 0010*

Historia AG-0010: Científico, Escenario 1	
Característica / Funcionalidad	Necesito visualizar las interacciones entre variables climáticas mediante diagramas.
Razón / Resultado	Con la finalidad de comprender las relaciones causa-efecto en el contexto del cambio climático.
Criterio de aceptación	Visualización de diagrama DPSIR y reglas en la herramienta.
Contexto	En caso de que se necesite visualizar un diagrama creado anteriormente.
Evento	En caso de que se seleccione un diagrama creado anteriormente.
Resultado / Comportamiento esperado	El sistema mostrará un diagrama que representa las interacciones entre las variables seleccionadas.

Tabla 2*Historia de usuario AG - 0020*

Historia AG-0020: Científico, Escenario 2	
Característica / Funcionalidad	Necesito obtener los datos de relaciones causa-efecto.
Razón / Resultado	Con la finalidad de compartir y respaldar los datos.
Criterio de aceptación	Exportación de reporte y diagrama interactivo.
Contexto	En caso de que se necesite compartir la información realizada.
Evento	Cuando el usuario seleccione la opción de reporte.
Resultado / Comportamiento esperado	El sistema generará un reporte con los datos en un formato compatible para análisis externo.

Tabla 3*Historia de usuario AG - 0030*

Historia AG-0030: Científico, Escenario 3	
Característica / Funcionalidad	Necesito validar relaciones causa-efecto entre variables en el sistema.

Razón / Resultado	Con la finalidad de asegurar la precisión de los datos.
Criterio de aceptación	Validación de relaciones.
Contexto	En caso de que se necesite compartir la información realizada.
Evento	Cuando se actualice el diagrama con nuevas relaciones.
Resultado / Comportamiento esperado	El sistema validará las relaciones y mostrará una lista.

Tabla 4

Historia de usuario AG - 0040

Historia AG-0040: Actor comunitario, Escenario 1	
Característica / Funcionalidad	Necesito una interfaz intuitiva que grafique las relaciones causales que impactan al cambio climático.
Razón / Resultado	Con la finalidad de entender mejor su impacto y generar estrategias de mitigación o adaptación.
Criterio de aceptación	Creación de diagramas DPSIR.
Contexto	En caso de que se necesite crear un nuevo diagrama (Escenario o caso).
Evento	Cuando el usuario cree un nuevo diagrama.
Resultado / Comportamiento esperado	El sistema plasmará la plantilla para mover las diferentes variables climáticas del diagrama DPSIR.

Tabla 5

Historia de usuario AG - 0050

Historia AG-0050: Actor comunitario, Escenario 2	
Característica / Funcionalidad	Necesito que se creen versiones del diagrama de un proyecto.
Razón / Resultado	Con la finalidad de visualizar los cambios hechos a lo largo del tiempo.
Criterio de aceptación	Creación de una nueva versión de un diagrama existente.
Contexto	En caso de que se requiera hacer una comparación entre versiones.
Evento	Cuando el usuario revise el historial de un proyecto.

**Resultado / Comportamiento
esperado**

El sistema mostrará las versiones guardadas del proyecto.

2.3 Requerimientos funcionales

Con el objetivo de garantizar que el sistema cumpla con las expectativas y necesidades identificadas, los requerimientos se dividen en cuatro categorías.

Funcionalidades básicas del manejo de diagramas DPSIR: Estas funcionalidades aseguran la organización y flexibilidad en los diagramas, permitiendo agregar, eliminar y conectar componentes de manera intuitiva. Estas funcionalidades minimizan complicaciones técnicas y promueven la facilidad de uso.

Manejo de control de versiones en los diagramas: Estas funcionalidades garantizan un control robusto, incluyendo creación de versiones, sincronización de cambios y revisión de modificaciones. Esto asegura un historial claro y consistente en la evolución de los diagramas.

Creación y uso de reglas de interacción: Este requerimiento permite gestionar reglas que definen relaciones causa-efecto entre componentes. Facilita el análisis del impacto de cada componente e incluye la generación de reportes para revisar reglas creadas.

Interacción accesible para explorar relaciones causales: El sistema debe ofrecer retroalimentación visual, reorganización automática y filtros para comprender diagramas complejos. Visualizaciones interactivas y storytelling garantizarán que la comunidad no especializada comprenda las relaciones fácilmente.

A continuación, se detallan los requerimientos de manera modular.

2.3.1 Funcionalidades básicas del manejo de diagramas DPSIR

La interfaz debe permitir al usuario agregar nuevos nodos al diagrama (RF101), especificando su tipo, como presión, estado o respuesta, y definiendo sus atributos asociados. Además, los usuarios podrán eliminar componentes del diagrama (RF102), garantizando que las conexiones asociadas se eliminen de manera segura sin comprometer la integridad general del diagrama. También será posible crear y modificar conexiones entre los componentes (RF103),

especificando las relaciones de causa-efecto que los vinculan. El sistema permitirá modificar los atributos de los componentes existentes (RF104), como nombre, tipo o descripción, directamente desde la interfaz gráfica. Es importante que la interfaz sea diseñada para ser intuitiva y accesible (RF105), que facilite la navegación y el uso de todas las funcionalidades mediante elementos visuales familiares, instrucciones claras y retroalimentación.

2.3.2 Manejo de control de versiones en los diagramas

El sistema permitirá recuperar la última versión del diagrama almacenado (RF201), asegurando que los usuarios trabajen siempre con la versión más actualizada. A su vez se podrán sincronizar los cambios realizados en el diagrama con el repositorio central (RF202), manteniendo un registro actualizado y colaborativo. Los usuarios podrán realizar solicitudes específicas para modificar componentes o relaciones (RF203), las cuales serán revisadas antes de ser confirmadas, asegurando un flujo de trabajo controlado. Por último, la funcionalidad de enviar cambios (RF204) permitirá confirmar los cambios realizados, registrando cualquier modificación de manera que sea accesible para futuras referencias.

2.3.3 Creación y uso de reglas de interacción

Los usuarios podrán definir reglas que especifiquen cómo se relacionan ciertos componentes del diagrama (RF301), estableciendo tanto las condiciones como las acciones resultantes. Una vez creadas, estas reglas podrán ser editadas o eliminadas a través de una interfaz clara y accesible (RF302), facilitando su administración. Se incluye en el sistema la validación de reglas (RF303), garantizando que no existan inconsistencias y que las relaciones sean precisas y verificables. Es así como se permitirá la creación de reportes que detallen las conexiones y reglas establecidas en los diagramas (RF304), proporcionando una visión clara y estructurada de las relaciones en el sistema.

2.3.4 Interacción accesible para explorar las relaciones causales

El sistema podrá reorganizar automáticamente los diagramas para optimizar su visualización y minimizar el solapamiento entre los componentes (RF401). Además, se permitirá la aplicación

de filtros (RF402) para resaltar ciertas variables o relaciones, ayudando a los usuarios a enfocar su análisis en aspectos específicos. Por último, el sistema ofrecerá retroalimentación visual en tiempo real (RF404) durante la manipulación de los componentes o relaciones, permitiendo a los usuarios comprender el impacto inmediato de sus acciones.

2.4 Requerimientos no funcionales.

2.4.1 Usabilidad

La herramienta se centrará en ser fácil de usar para usuarios con diferentes niveles de experiencia técnica (US01), proporcionando una interfaz gráfica intuitiva y consistente basada en principios de diseño como storytelling con datos y visualización interactiva (US02). Además, incluirá tutoriales o guías contextuales para ayudar a los usuarios a explorar las funcionalidades de manera sencilla (US03). El sistema ofrecerá retroalimentación clara y en tiempo real (US04), mostrando resultados visuales instantáneos en operaciones como agregar nodos, aplicar filtros o resolver conflictos, para mejorar la comprensión del usuario (US05). Como plataforma web, estará accesible desde navegadores modernos y dispositivos móviles gracias a su diseño responsivo (US06), garantizando un acceso universal y facilitando su uso en diversos contextos.

2.4.2 Rendimiento

El sistema garantizará un rendimiento óptimo, incluso al manejar diagramas con más de 500 nodos y conexiones, asegurando una complejidad temporal de $O(n \log n)$ para consultas de recorrido como búsqueda en grafos, y $O(1)$ para operaciones de acceso local, por ejemplo, accesos directos a nodos en memoria (RE01). Las operaciones básicas, como el acercamiento/alejamiento, la reorganización y la aplicación de filtros, tendrán un tiempo de respuesta inferior a 2 segundos, validado mediante pruebas de rendimiento detalladas en el Apéndice A (RE02). Asimismo, el procesamiento de reglas será eficiente, completándose en menos de 2 segundos por regla en diagramas complejos (RE03).

2.4.3 Escalabilidad

La herramienta está diseñada para ser escalable, soportando un aumento en la demanda de usuarios concurrentes mediante escalabilidad horizontal, lo que permite distribuir la carga de trabajo a través de la adición de nodos o servidores, mejorando el rendimiento del sistema en escenarios distribuidos (Barzu, Barbulescu, & Cărăbaș, 2017). Además, se integra con datos externos mediante el uso de JSON, un formato adoptado que permite representar datos en pares clave-valor, lo cual facilita su interoperabilidad y compatibilidad con diversos lenguajes de programación (Petković, 2017). Este diseño no solo mejora la flexibilidad, sino que también asegura que el sistema pueda adaptarse a futuros entornos tecnológicos.

2.4.4 Seguridad

El sistema incluirá un robusto control de acceso mediante mecanismos de autenticación y autorización, permitiendo la asignación de roles específicos como científicos, administradores o colaboradores comunitarios, garantizando la seguridad en el acceso a los recursos críticos del sistema (Korchenko et al., 2020). Se empleará cifrado avanzado para el almacenamiento y la transferencia de datos, asegurando la integridad y confidencialidad de la información mediante estándares modernos de seguridad (Ajiga, Okeleke, Folorunsho, & Ezeigweneme, 2024).

2.4.5 Mantenibilidad

El diseño del sistema será modular (MA01), lo que permitirá añadir o actualizar funcionalidades sin afectar otros componentes. Asimismo, se proporcionará documentación técnica y de usuario estructurada que incluya ejemplos claros para el uso de librerías y APIs (MA02).

2.4.6 Accesibilidad

La herramienta garantizará inclusividad cumpliendo con las directrices WCAG 2.1, lo que incluye compatibilidad con lectores de pantalla y esquemas de colores accesibles (AC01). Además, la interfaz estará disponible inicialmente en español y en futuras versiones contará con soporte para ampliarse a otros idiomas (AC02).

2.4.7 Compatibilidad

El sistema permitirá la integración con herramientas externas como sistemas de control de versiones, facilitando la gestión colaborativa de cambios en los diagramas (CO01).

2.4.8 Experiencia de usuario

El sistema garantizará una visualización clara de nodos y conexiones (EU01). También incorporará herramientas para narrativas visuales en los reportes (EU02). Finalmente, se implementarán funcionalidades interactivas como acercamientos y alejamientos, gestión del foco y agrupamiento visual, lo que facilitará la exploración del diagrama (EU03).

2.5 Riesgos y beneficios de la solución

2.5.1 Riesgos

La implementación de la herramienta presenta ciertos riesgos que deben considerarse como el riesgo de la falta de adopción por parte de los usuarios si la herramienta no es lo suficientemente intuitiva o no satisface necesidades específicas. También se debe tener en cuenta la integridad de los datos, ya que la entrada de datos incorrectos o incompletos podría comprometer la precisión de los resultados generados, afectando su utilidad. Además, la dependencia tecnológica de la base de datos basada en grafos como lo es Neo4j, y otras herramientas específicas podría limitar la portabilidad del sistema o incrementar los costos de infraestructura, especialmente si se requieren actualizaciones de software futuras. Finalmente, la ciberseguridad es un factor crítico, ya que la gestión de datos sensibles podría exponer al sistema a riesgos si no se implementan medidas de protección adecuadas.

2.5.2 Beneficios

A pesar de los riesgos, Link-Graph ofrece múltiples beneficios. Facilita la comprensión de dinámicas causales mediante una representación estructurada de relaciones causa-efecto, promoviendo la participación tanto de expertos como de la comunidad no especializada en temas ambientales. Además, fomenta la colaboración interdisciplinaria y ciudadana, integrando conocimientos diversos para un trabajo en equipo.

La herramienta destaca por su flexibilidad analítica, permitiendo explorar escenarios mediante la generación y validación de reglas, así como la gestión de versiones. Esto contribuye a desarrollar políticas sostenibles y resilientes frente al cambio climático. Es importante mencionar que su adaptabilidad a contextos como salud pública, gestión de riesgos y planificación urbana amplía su impacto potencial.

2.6 Principios de diseño

Los principios mencionados en esta sección están basados en los enfoques descritos por (Booch, Rumbaugh, & Jacobson, 2007) en el diseño de software orientado a objetos y adaptados a contextos gráficos interactivos según la teoría de Interacción Humano-Computador.

La resolución de estos principios y sus descripciones específicas se han planteado en función del análisis detallado de los requerimientos funcionales y no funcionales de la herramienta propuesta en las secciones 2.3 y 2.4. Dichos requerimientos incluyen aspectos como la visualización interactiva, la generación de reglas dinámicas, la gestión de versiones y la exploración de relaciones complejas. A través de este análisis, se identificaron necesidades clave que estos principios abordan, asegurando que la solución sea robusta, accesible y centrada en el usuario.

2.6.1 Manejo de componentes en el diagrama

2.6.1.1 Principios de Usabilidad

El diseño debe garantizar consistencia visual y funcional en la interfaz del sistema. Esto incluye proporcionar retroalimentación inmediata al realizar cambios en nodos o conexiones, así como minimizar la carga cognitiva del usuario mediante la organización por capas del diagrama (Mendel & Pak, 2009).

2.6.1.2 Principios de Intuitividad

La simplicidad debe ser prioritaria en el diseño, minimizando los pasos necesarios para realizar tareas como agregar o modificar nodos. Metáforas visuales, como el uso de flechas para

indicar causalidad y colores para clasificar variables DPSIR, son esenciales para facilitar la interpretación (Marcus, 2001).

2.6.2 Manejo de control de versiones en los diagramas

Principio de usabilidad: El control de versiones debe ser fácil de usar, con botones etiquetados para operaciones de enviar cambios o de obtener versión más reciente. Además, el sistema debe proporcionar retroalimentación inmediata sobre el estado de los cambios y un historial accesible para rastrear versiones anteriores.

2.6.3 Creación y uso de reglas de interacción

Principios de usabilidad: La creación de reglas debe ser clara y accesible, utilizando editores visuales con lenguaje natural del tipo *Si-entonces*. El sistema debe proporcionar retroalimentación visual al aplicar reglas, coloreando los nodos afectados.

2.6.4 Interacción accesible para explorar las relaciones complejas dentro del diagrama

Principio de visualización interactiva: El sistema debe permitir la exploración dinámica del diagrama mediante alejamiento y acercamiento progresivo. La actualización en tiempo real al aplicar cambios asegura que los usuarios puedan interpretar fácilmente los datos presentados (Latendresse & Karp, 2011).

2.7 Prototipado

Como parte del desarrollo de la herramienta, se ha diseñado un prototipo interactivo utilizando Figma, una herramienta especializada en la creación de interfaces de usuario. Esta plataforma facilita la colaboración entre diseñadores y desarrolladores, integrando elementos de diseño intuitivo y funcional (Hong, 2023). Este prototipo tiene como objetivo representar visualmente la interacción entre los usuarios y la herramienta, integrando los requerimientos funcionales, no funcionales, y principios de diseño previamente establecidos.

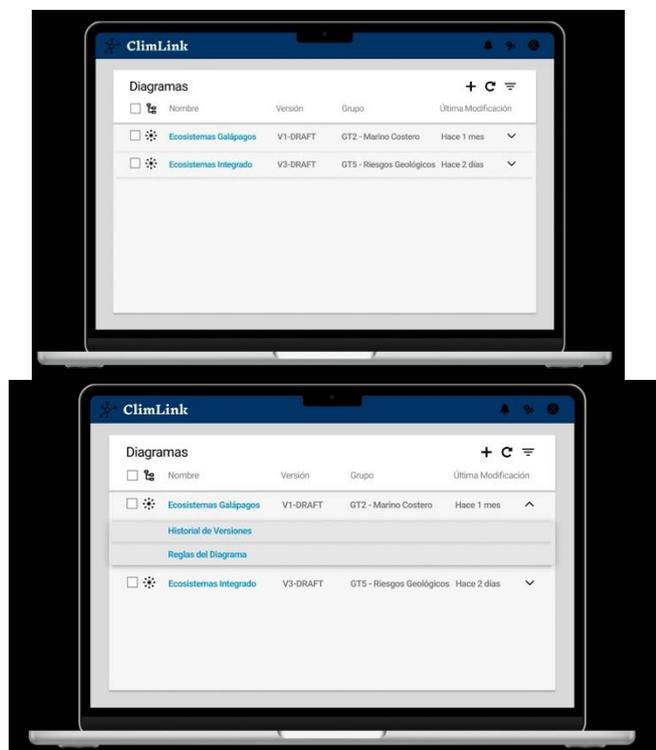
El enfoque del prototipo busca garantizar que tanto los científicos como la comunidad general puedan utilizar la herramienta de manera intuitiva, eficiente y sin barreras técnicas.

2.7.1 Dashboard de organización

El programa comienza con un panel o dashboard principal, diseñado como un punto de acceso centralizado que permite a los usuarios interactuar con las funciones clave del sistema. Desde este panel, los usuarios pueden navegar directamente al diagrama principal, gestionar las reglas definidas o explorar el historial de versiones. El dashboard presenta información relevante que facilita la comprensión inicial del diagrama, proporcionando una visión general de su estructura y estado actual.

Figura 3

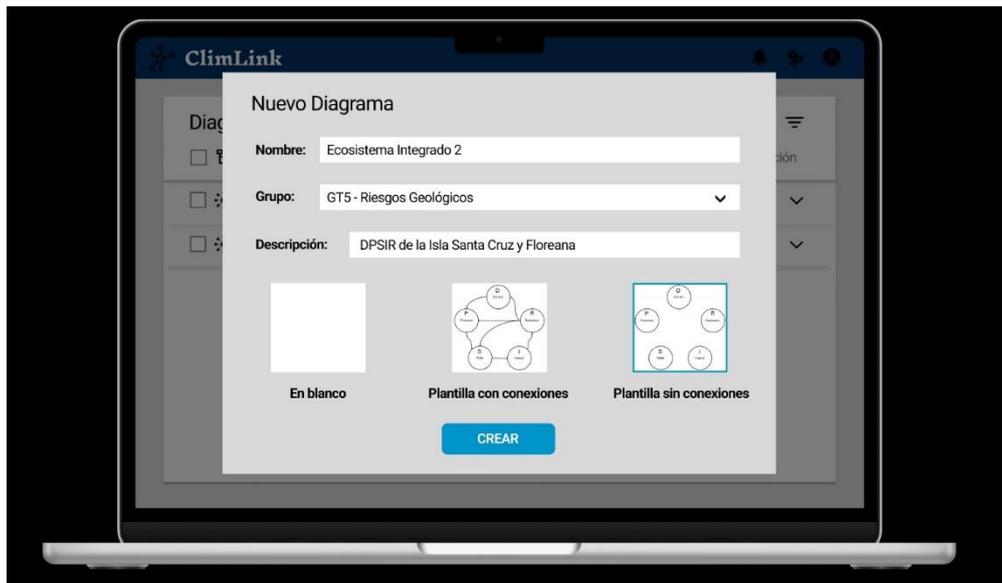
Dashboard del prototipo



Entre las funcionalidades principales del sistema se encuentran: acceder a un diagrama, crear un nuevo diagrama, recargar el dashboard y aplicar filtros a los elementos. Al crear un nuevo diagrama, se han incorporado opciones clave para personalizarlo, incluyendo la asignación de un nombre, la selección de un grupo, una descripción, y la posibilidad de elegir entre tres formatos iniciales: un diagrama en blanco, una plantilla con conexiones predefinidas o una plantilla sin conexiones. Estas opciones garantizan flexibilidad y adaptabilidad para satisfacer las necesidades específicas de los usuarios.

Figura 4

Ventana de creación de diagrama

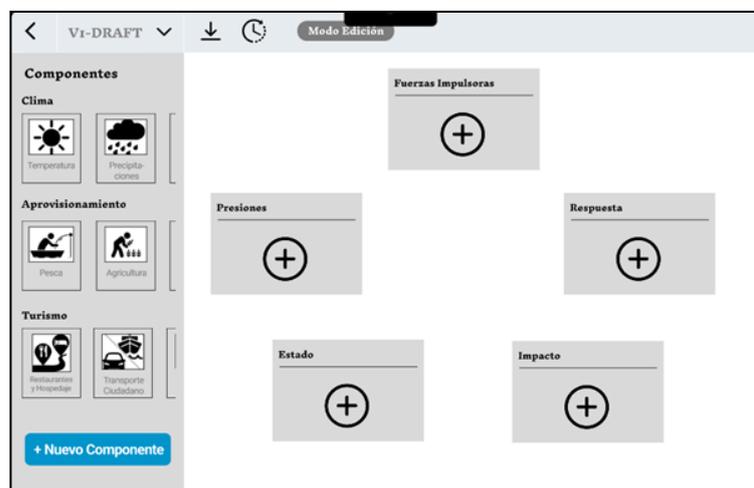


2.7.2 Gestión de grupos, secciones y componentes

Dentro del marco DPSIR, se definieron los siguientes conceptos clave para la organización del sistema: Secciones: corresponden a los elementos principales del marco DPSIR (Fuerzas impulsoras, Presiones, Estado, Impactos y Respuestas). Grupos: representan un conjunto de componentes organizados por categoría dentro de una sección. Componentes: Son las variables climáticas específicas. Esta jerarquía facilita la identificación de relaciones causa-efecto y contribuye a estructurar de manera coherente el análisis y la gestión de sistemas complejos (Patrício, 2016).

Figura 5

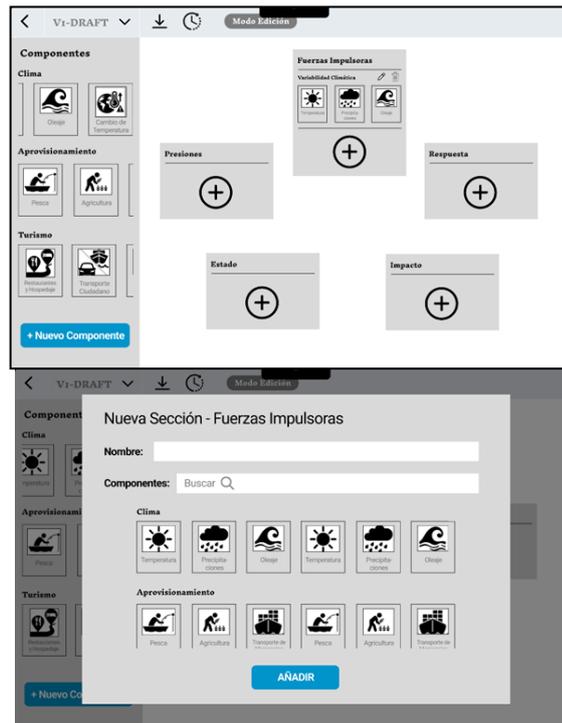
Diagrama base en un prototipo de ejemplo



Las secciones se obtienen a través de un panel que permite organizarlas de forma flexible y personalizada. Cada sección es completamente adaptable, lo que facilita su configuración según las necesidades específicas del usuario.

Figura 6

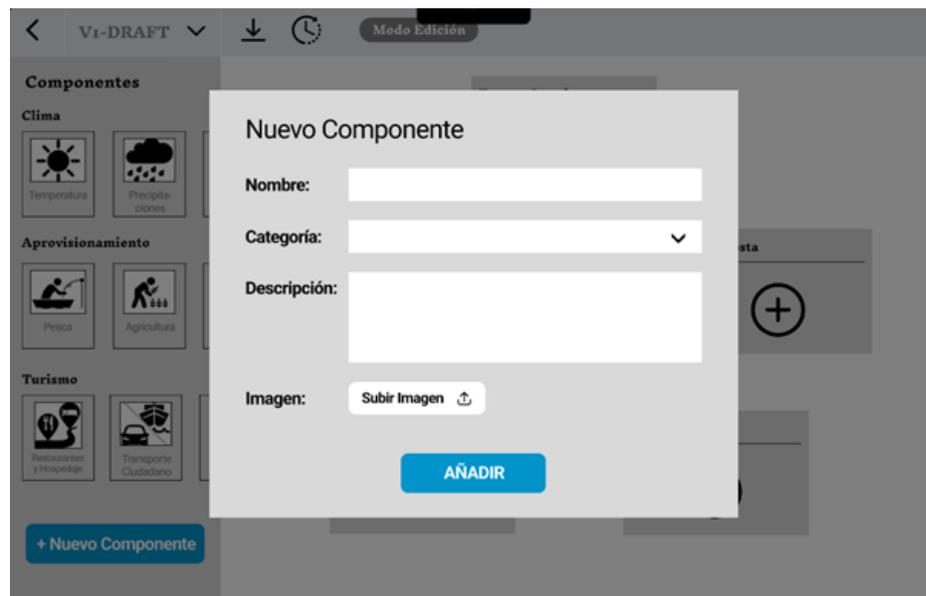
Creación de una nueva sección en un prototipo de ejemplo



Los componentes, además de incluir los preexistentes que pueden compartirse entre distintos diagramas, pueden ser creados y personalizados. Cada componente tendrá asociado un nombre y una descripción. Se prevee que, en el futuro se permita cargar una imagen asociada al componente.

Figura 7

Creación de un componente en un prototipo de ejemplo



2.7.3 Gestión de reglas

El sistema de manejo de reglas permite definirlas en distintos niveles: a nivel de componentes individuales, grupos específicos o secciones completas dentro del diagrama.

Cabe destacar que la lógica de las reglas se implementa mediante secuencias *si-entonces*, lo que proporciona flexibilidad para modelar condiciones y relaciones dinámicas dentro del marco del sistema (H. Kiendl).

Tomemos como ejemplo la regla: "Si aumenta la temperatura global, entonces disminuye la superficie de glaciares". En un diagrama, esta relación se representaría con un componente que simboliza la variable *Temperatura global* dentro del grupo *clima*, relacionado por una regla hacia otro componente *Superficie de glaciares*, dentro de un grupo en la sección de *Estado*. Al implementar esta regla, un aumento en el componente de *Temperatura global* podría activar una disminución proporcional en el componente de *Superficie de glaciares*, con retroalimentación visual dentro del diagrama. Este tipo de representación no solo facilita la comprensión de relaciones complejas, sino que también permite simular distintos escenarios para evaluar los impactos potenciales de variables climáticas.

Figura 8

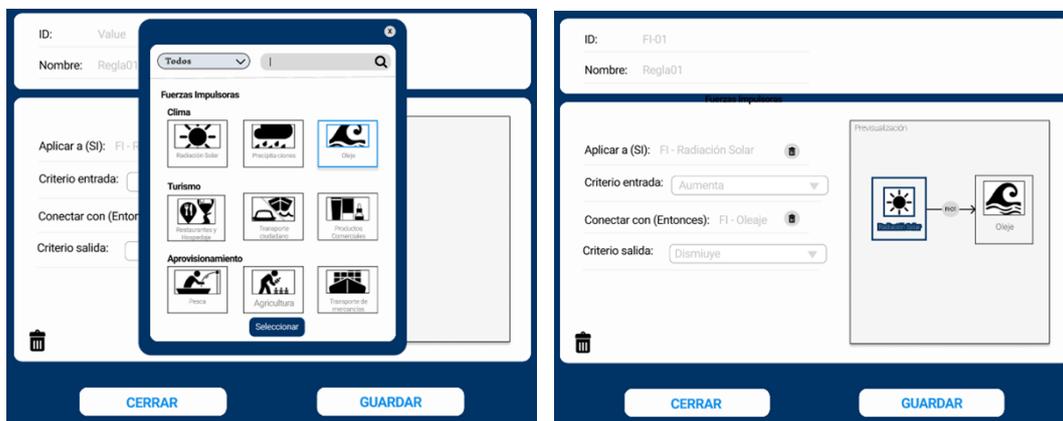
Creación de una regla en un prototipo de ejemplo



Las reglas permiten especificar el tipo de relación entre los elementos, ya sea que esta implique un aumento, una disminución u otro tipo de cambio. Del mismo modo, es posible incluir el valor del peso asociado a la relación cuando sea necesario, lo que añade precisión y detalle al modelado.

Figura 9

Gestión de una regla en un prototipo de ejemplo



El sistema permite relacionar y organizar las secciones dentro del diagrama a través de conexiones manuales mediante arrastre, similar a la funcionalidad de prototipado que ofrece la herramienta Figma (Oliveira & Monteiro, 2023).

2.7.4 Creación de reportes y validación de reglas

Para la creación de reportes, el sistema incluye un botón claramente identificado como *Generar Reporte*, que permite al usuario acceder a un resumen de las reglas utilizadas en el diagrama. Estos reportes están diseñados para presentar la información de manera clara y accesible, integrando elementos de storytelling con datos, como visualizaciones gráficas, descripciones narrativas. El objetivo principal de estos reportes es facilitar la comprensión de las reglas aplicadas y su impacto en el sistema.

2.7.4.1 Validación de reglas

La validación de las reglas creadas en el diagrama se realiza mediante un enfoque estructurado basado en dos métodos complementarios. En primer lugar, se evalúa la coherencia interna de las reglas para garantizar la ausencia de conflictos entre ellas. En segundo lugar, se verifica la aplicabilidad de las reglas en el contexto del grafo actual, asegurando que las condiciones definidas se cumplen en los nodos y relaciones establecidas (B. Meester, 2020).

Para garantizar la aplicabilidad y la coherencia, la validación de las reglas se realiza mediante un proceso supervisado por científicos, investigadores o expertos. Este proceso incluye la revisión detallada de las reglas aplicadas en el diagrama, las cuales se presentan en reportes diseñados específicamente para destacar las reglas utilizadas y sus efectos en el sistema. Estos reportes permiten identificar y corregir posibles errores, omisiones o interpretaciones incorrectas. Además, es posible categorizar las reglas en tres estados: Validada, cuando la regla es lógica y aplicable de acuerdo con la teoría; En revisión, cuando se requiere análisis adicional o ajustes; y Rechazada, si la regla presenta problemas significativos que impiden su aplicación (B. Meester, 2020).

2.7.5 Gestión de versiones

Las versiones se gestionan a través de un sistema integrado en el dashboard principal, donde los usuarios pueden visualizar, comparar y restaurar versiones del grafo de manera sencilla. Estas versiones incluyen metadatos clave como el autor del cambio, la fecha y hora, y una descripción

opcional. Los metadatos, definidos como datos estructurados que describen información sobre otros datos, son fundamentales para la organización y el rastreo de cambios dentro de sistemas complejos (Mark Scott, 2017). Este enfoque permite a los usuarios navegar por un historial de versiones, identificar diferencias en nodos y relaciones al comparar dos versiones, y revertir el grafo a un estado anterior si es necesario (Y. Wang, 2012).

2.8 Evaluación

El sistema Link-Graph se desarrolló como una herramienta interactiva para facilitar la visualización, análisis y gestión de relaciones causa-efecto asociadas al cambio climático. Diseñado como parte del proyecto Clim-Red, busca conectar a la comunidad científica con la sociedad, promoviendo la comprensión de dinámicas climáticas con el propósito de tomar correctivos y proponer políticas que favorezcan a la toma de decisiones informadas.

Para evaluar la efectividad del sistema, se llevó a cabo un estudio con dos grupos principales: investigadores y científicos especializados en el área ambiental, y miembros de la comunidad general sin experiencia previa en ciencias climáticas. El propósito de esta evaluación fue analizar si la herramienta cumple con los objetivos de usabilidad, impacto educativo y rendimiento técnico, garantizando su utilidad para usuarios con distintos niveles de conocimiento y experiencia.

A continuación, se describen los participantes, las estrategias de evaluación y la metodología implementada.

2.8.1 Participantes

El estudio contó con la participación de 10 personas, distribuidas en los siguientes grupos:

Especialistas en ciencias climáticas: cinco participantes con experiencia en cambio climático, modelado de sistemas complejos o análisis de datos ambientales. Representaron el grupo técnico, evaluando la precisión, utilidad y relevancia del sistema para investigaciones científicas.

Comunidad sin experiencia en ciencias climáticas: cinco participantes sin experiencia previa en teoría de grafos ni cambio climático. Este grupo evaluó la accesibilidad, intuitividad y

valor educativo de la herramienta. Los participantes fueron invitados a participar mediante convocatoria directa, asegurando diversidad en perfiles y perspectivas. Antes de las pruebas, se ofreció una breve introducción al sistema, destacando su propósito y funcionalidades.

Véase en el Apéndice D información complementaria de las entrevistas.

2.8.2 Aspectos por evaluar

Tabla 6

Evaluación de la satisfacción del usuario

Aspecto por evaluar	Satisfacción del usuario
Metodología	<p>Objetivo: Medir la percepción de los usuarios sobre la facilidad de uso, utilidad y calidad de la herramienta.</p> <p>Instrumento: Medir la percepción de los usuarios sobre la facilidad de uso, utilidad y calidad de la herramienta.</p>
Resultados esperados	Identificar aspectos positivos y áreas de mejora en la experiencia del usuario, y comparar percepciones entre científicos y la comunidad general.

Tabla 7

Evaluación del impacto educativo

Aspecto por evaluar	Impacto educativo
Metodología	<p>Objetivo: Determinar si la herramienta mejora la comprensión de las dinámicas climáticas en la comunidad.</p> <p>Instrumento: Cuestionario de conocimientos aplicado antes y después de usar el sistema, incluyendo preguntas sobre la relación entre fuerzas motrices y presiones, e impactos y respuestas dentro del marco DPSIR.</p> <p>Medición: Incremento en los puntajes entre el pre-test y el post-test, y opiniones cualitativas sobre la utilidad de las visualizaciones para aprender.</p>
Resultados esperados	Evidencia de un aumento en el nivel de conocimiento tras el uso del sistema e identificación de elementos que contribuyan al aprendizaje.

Tabla 8*Evaluación de la usabilidad y eficiencia*

Aspecto por evaluar	Usabilidad y eficiencia
Metodología	<p>Objetivo: Evaluar la facilidad con la que los usuarios completan tareas específicas.</p> <p>Tareas: Crear un nodo y establecer una conexión, aplicar un filtro para identificar relaciones clave, definir y ejecutar una regla.</p> <p>Medición: Tiempo promedio para completar cada tarea, número de errores cometidos, y comentarios sobre dificultades encontradas.</p>
Resultados esperados	Identificar elementos de la interfaz o funcionalidad que requieran ajustes y evaluar la curva de aprendizaje para diferentes perfiles de usuarios.

Tabla 9*Evaluación de la generación de reportes de reglas para científicos*

Aspecto por evaluar	Generación de reportes de reglas para científicos
Metodología	<p>Objetivo: Evaluar la utilidad y claridad de los reportes generados sobre las reglas definidas y aplicadas en el sistema.</p> <p>Pruebas realizadas: Generar reportes con distintos conjuntos de reglas que incluyan condiciones, acciones y resultados aplicados al grafo.</p> <p>Medición: Verificar la comprensión de los reportes por parte de los científicos, midiendo su capacidad para identificar patrones, dependencias y resultados clave a partir de la información proporcionada.</p> <p>Instrumentos: Encuestas y entrevistas con científicos para evaluar la utilidad, claridad y nivel de detalle en los reportes generados.</p>
Resultados esperados	Los reportes deben facilitar a los científicos la identificación de cómo las reglas afectan el grafo, proporcionando evidencia clara y organizada para apoyar análisis y decisiones. Además, se espera identificar oportunidades para mejorar la presentación visual o el formato del reporte.

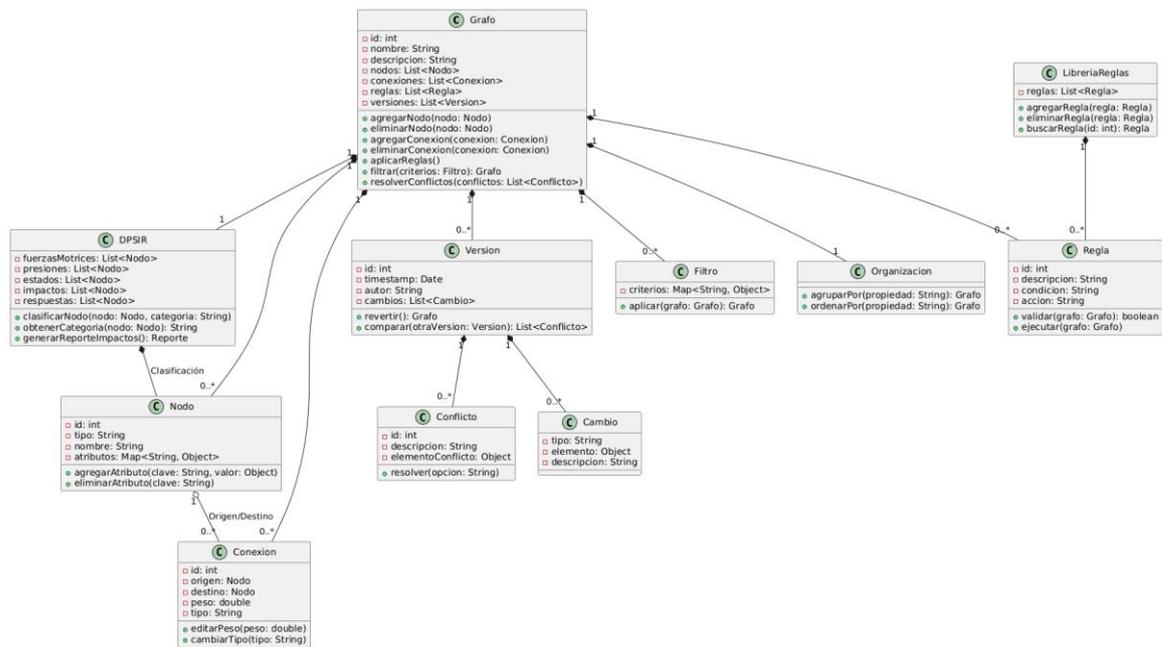
2.9 Arquitectura de la solución

2.9.1 Arquitectura lógica

La arquitectura lógica integra los componentes esenciales para gestionar, analizar y visualizar diagramas en el contexto del marco DPSIR. La herramienta permite la manipulación y organización de nodos y conexiones dentro del diagrama, la definición y ejecución de reglas, el control de versiones para asegurar trazabilidad, y la integración de herramientas avanzadas como filtros y organización.

Figura 10

Arquitectura lógica de la herramienta Link-graph



Esta arquitectura es modular, lo que facilita la escalabilidad y la incorporación de nuevas funcionalidades, como la generación de reportes basados en categorías DPSIR. Con este diseño, se busca cubrir necesidades clave como la exploración interactiva, el análisis de dinámicas complejas, y el soporte para la toma de decisiones informadas.

Tabla 10

Descripción de los componentes en la arquitectura lógica

	Descripción	Utilidad
Grafo	Contiene la estructura principal que relaciona nodos	Proporciona una representación flexible y

	con aristas, que representan las variables climáticas con las reglas si-entonces.	manipulable de sistemas complejos, como los representados en el marco DPSIR.
Nodo	Representa una variable climática dentro del grafo.	Facilita la representación y análisis de elementos climáticos.
Conexión	Modela las relaciones causales entre nodos.	Representa las interacciones y dependencias entre variables climáticas.
Librería de reglas	Gestiona las conexiones para su reutilización en diferentes diagramas.	Facilita la reutilización y estandarización de reglas.
Versión	Administra los cambios realizados en el grafo.	Provee trazabilidad con la capacidad de revertir o comparar estados del grafo.
DPSIR	Clasifica nodos y genera reportes basados en categorías DPSIR.	Integra el marco DPSIR en el análisis, permitiendo una mejor organización y priorización de variables.
Filtro	Aplica criterios de selección a los nodos y conexiones del grafo.	Permite realizar análisis enfocándose en elementos relevantes dentro del grafo.
Organización	Ordena elementos del grafo según sus atributos	Mejora la navegabilidad del grafo.

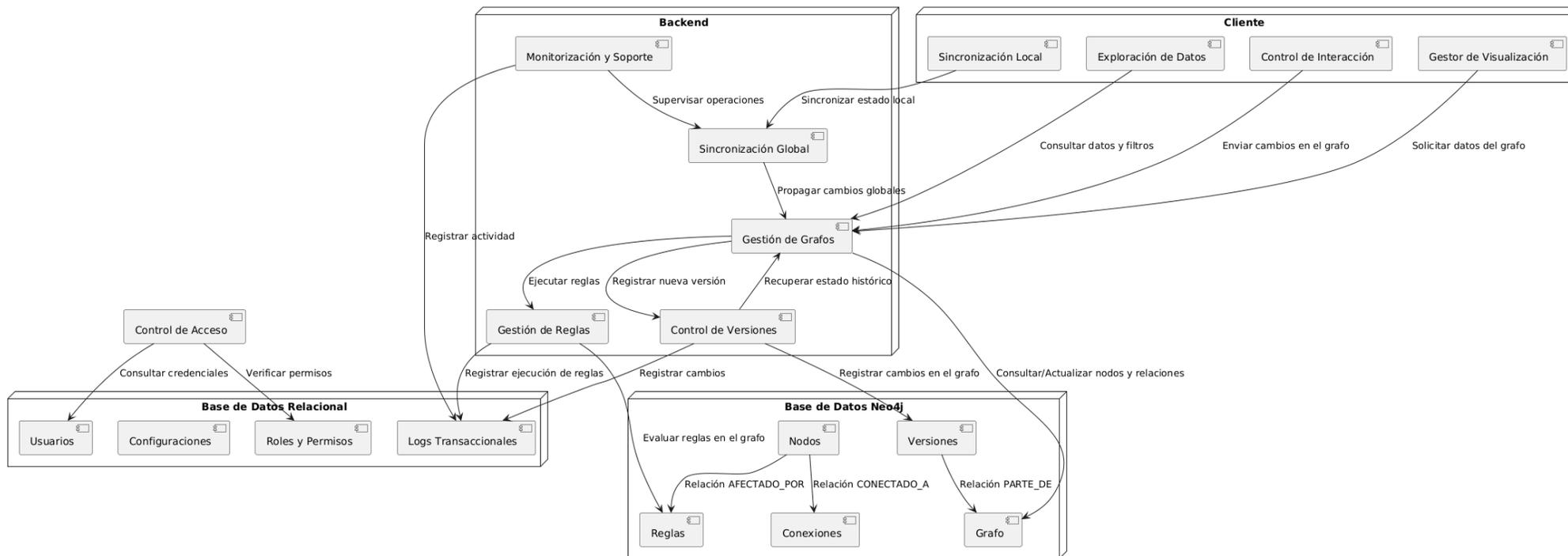
2.9.2 Vista de procesos

La vista de procesos de Link-Graph está diseñada para reflejar la interacción entre los procesos en una arquitectura cliente-servidor, asegurando claridad visual, definición de roles y flujos de comunicación estructurados. Los componentes se dividen en procesos del cliente, que se enfocan en la interacción y visualización, y procesos del servidor, responsables de administrar y sincronizar los datos de los diagramas. Esta organización permite comprender cómo las solicitudes

del cliente, como modificaciones o consultas, son procesadas y respondidas por el servidor. Además, las interacciones están representadas mediante flechas que destacan el flujo de solicitudes y respuestas, promoviendo una navegación intuitiva y eficiente dentro del sistema. De esta manera, la clara diferenciación de roles entre cliente y servidor, junto con un diseño visual intuitivo, fortalece la usabilidad y eficiencia del sistema (O. Mishchenko, 2010); (Mohammad Faiz, 2016).

Figura 11

Vista de procesos de la herramienta.



El diagrama está organizado en dos paquetes: cliente y servidor. Estos componentes serán explicados de manera independiente, resaltando sus dependencias y funcionalidades. Este enfoque modular permite comprender cómo cada componente contribuye al sistema en su conjunto. Después de detallar estas partes, se abordarán las bases de datos utilizadas y su papel en el manejo de información.

2.9.2.1 Cliente

El cliente representa la interfaz mediante la cual los usuarios se relacionan con el sistema. Este componente se divide en varios módulos, cada uno con funciones específicas y responsabilidades definidas, garantizando una experiencia de usuario intuitiva y eficiente.

Gestor de Visualización (GV): Este módulo renderiza el grafo en pantalla y aplica filtros visuales dinámicos para facilitar la comprensión de las relaciones y nodos en el sistema. Además, permite la exploración interactiva de las conexiones entre elementos. Coordina con el backend mediante el módulo "Gestión de Grafos" para obtener datos iniciales y sincronizar el estado visual con las actualizaciones realizadas por otros usuarios (Latendresse M. &, 2011);(Latendresse & Karp, 2011).

Exploración de Datos (ED): Facilita consultas específicas y la aplicación de filtros sobre los datos del grafo, proporcionando herramientas avanzadas de búsqueda. Este módulo también interactúa con el backend para obtener datos filtrados y resultados de consultas.

Control de Interacción (CI): Permite a los usuarios modificar nodos, conexiones y reglas dentro del grafo. Las modificaciones realizadas se procesan localmente antes de ser enviadas al backend para actualizar el estado global. Coordina con el "Gestor de Visualización" para reflejar los cambios en tiempo real.

Sincronización Local (SL): Este módulo asegura que la copia local del grafo se mantenga actualizada con las modificaciones realizadas por otros usuarios, sincronizándose directamente con los módulos correspondientes (Faiz, 2016).

2.9.2.2 *Servidor*

El servidor actúa como el núcleo del sistema, gestionando toda la lógica de negocio y facilitando la comunicación entre el cliente y las bases de datos. Este componente incluye 5 módulos:

Gestión de Grafos (GG): Administra el grafo global, coordinando consultas, modificaciones y visualizaciones. También interactúa con módulos correspondientes para aplicar reglas definidas y registrar actualizaciones históricas.

Gestión de Reglas (GR): Define y aplica reglas que rigen las interacciones en el grafo. Evalúa reglas en la base de datos no relacional y registra actividades de la base relacional.

Sincronización Global (SG): Coordina las modificaciones realizadas por múltiples usuarios para garantizar la consistencia del grafo global.

Control de Versiones (CV): Gestiona el historial del grafo, permitiendo revertir cambios, realizar auditorías y comparar estados históricos.

Monitorización y Soporte (MS): Supervisa el rendimiento del sistema, detecta fallos y asegura su disponibilidad mediante estrategias de balanceo de carga y recuperación ante errores (Mishchenko, 2010);(Mishchenko et al., 2010).

2.9.2.3 *Bases de datos*

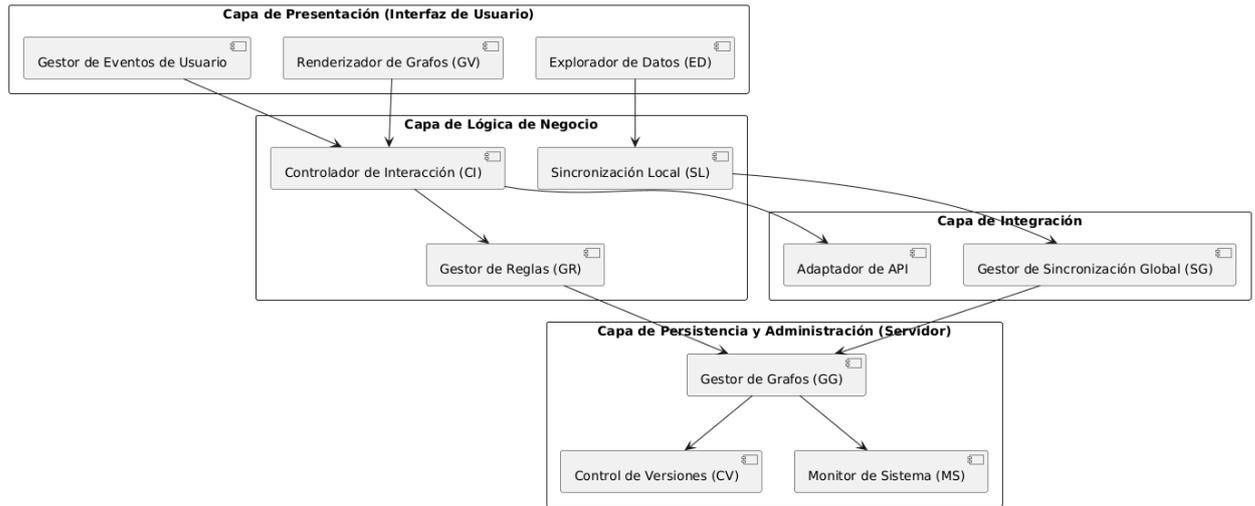
Para optimizar el desempeño y la organización de la información, el sistema utiliza dos bases de datos especializadas. Una está dedicada al manejo de grafos, permitiendo modelar relaciones complejas entre nodos y conexiones mediante estructuras dinámicas. La otra base de datos, orientada a datos administrativos, se encarga de almacenar registros transaccionales y configuraciones del sistema. Esta separación de responsabilidades garantiza un mejor rendimiento, escalabilidad y claridad en la gestión de diferentes tipos de datos (D. Rawat, 2017);(Gavriellov-Yusim & Friger, 2013). Estas descripciones se detallarán más adelante en el texto.

2.9.3 Vista de desarrollo

Se propone dividir la arquitectura en cuatro capas principales, organizadas según las responsabilidades de los módulos y sus relaciones.

Figura 12

Vista de desarrollo de la herramienta



La arquitectura de Link-Graph está estructurada en capas interdependientes que colaboran de manera integrada para brindar una experiencia de usuario intuitiva y un funcionamiento eficiente.

La capa de presentación regula la interacción entre el usuario y el sistema de forma dinámica y organizada. Dentro de esta capa, el Renderizador de Grafos (GV) juega un papel crucial, ya que se encarga de visualizar grafos, aplicar filtros interactivos y permitir la reorganización dinámica de elementos, lo que facilita la comprensión de las relaciones entre nodos (Watson, 2008). Mientras que el Explorador de Datos (ED) incorpora herramientas avanzadas para realizar consultas y analizar datos, el Gestor de Eventos de Usuario (GE) captura acciones como clics o modificaciones y las delega a módulos correspondientes, garantizando una interacción sin interrupciones.

En cuanto a la lógica del sistema, la capa de negocio define las reglas y procesos que gobiernan el comportamiento de Link-Graph. Un componente clave de esta capa es el Gestor de Reglas (GR), que implementa reglas de interacción y validación, asegurando la consistencia en las

transformaciones realizadas dentro del grafo. A la par, el módulo de Sincronización Local (SL) mantiene los datos del cliente alineados con los del servidor, lo que minimiza conflictos y preserva la integridad de los datos (Mohammad Faiz, 2016). Igualmente, el Controlador de Interacción (CI) gestiona las ediciones realizadas por los usuarios y actualiza el estado global del sistema de manera uniforme.

Por su parte, la capa de integración actúa como un puente entre el cliente y el servidor, asegurando transferencias de datos. El Adaptador de API abstrae las interacciones con las APIs del servidor, simplificando la compatibilidad entre módulos. A la vez, el Gestor de Sincronización Global (SG) coordina los cambios realizados por múltiples usuarios, asegurando que el estado del grafo permanezca consistente y sincronizado en tiempo real (Mishchenko, 2010).

Por último, la capa de persistencia y administración gestiona el almacenamiento centralizado de los datos del grafo. En esta capa, el Gestor de Grafos (GG) administra nodos, conexiones y atributos asociados. De manera similar, el Control de Versiones (CV) registra cambios históricos, lo que permite revertir estados, realizar auditorías y comparar configuraciones anteriores. Y como último componente, el Monitor de Sistema (MS) supervisa el rendimiento general, garantizando estabilidad a través de estrategias de recuperación y balanceo de carga (Ahmed & Navathe).

Con lo revisado anteriormente, la arquitectura de capas en Link-Graph asegura un flujo estructurado de operaciones, integrando presentación, lógica de negocio, y persistencia, para ofrecer un sistema eficiente y adaptable.

2.10 Diseño de la base de datos

El sistema Link-Graph se desarrolla para gestionar relaciones complejas representadas mediante grafos en el contexto de análisis de sistemas como el modelo DPSIR, permitiendo el análisis, la visualización de relaciones causales.

Para satisfacer las necesidades funcionales y no funcionales del sistema, hemos adoptado un enfoque híbrido en el diseño de la base de datos, combinando las fortalezas de Neo4j y una base de datos relacional.

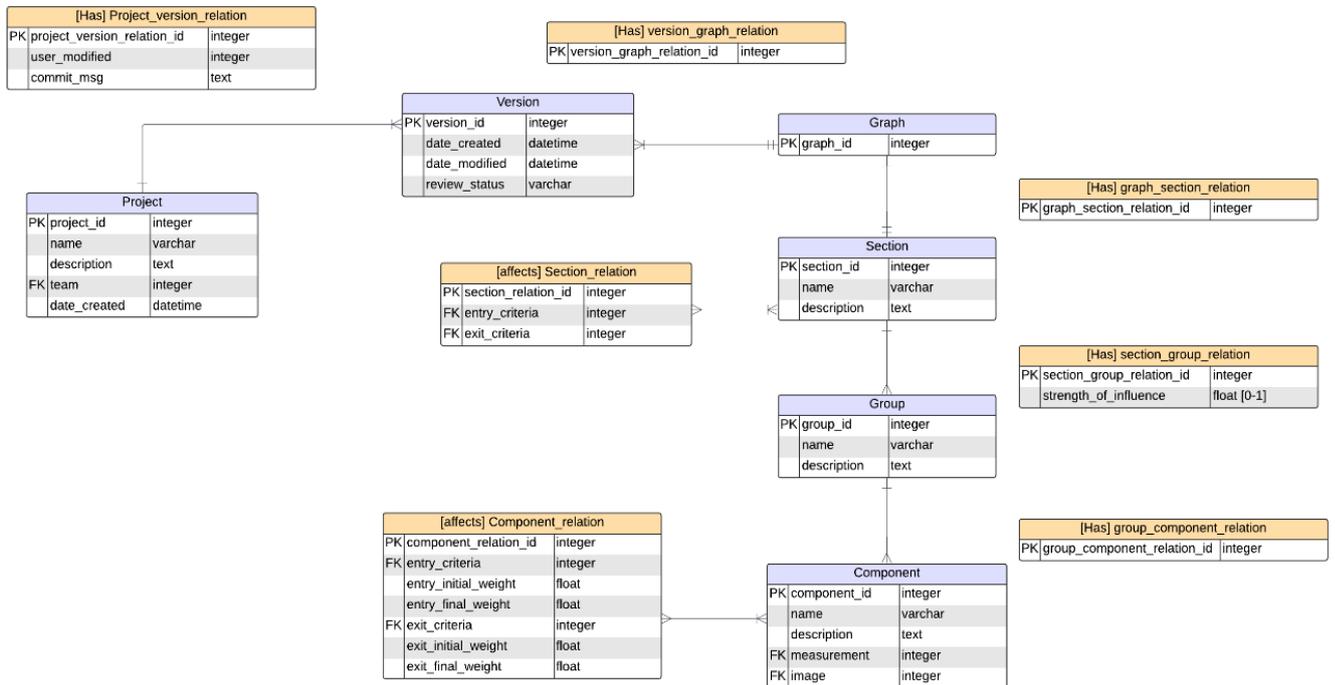
Este diseño híbrido responde a la necesidad de modelar y consultar grafos de alta complejidad mientras se administran eficientemente los datos auxiliares estructurados. Neo4j, como base de datos orientada a grafos, se encarga de almacenar nodos, relaciones, reglas y versiones del grafo, proporcionando consultas optimizadas y representación nativa de las estructuras gráficas. Por otro lado, la base de datos relacional complementa este sistema al gestionar datos no gráficos como usuarios, roles, permisos, configuraciones globales y logs transaccionales.

2.10.1 Diseño de base de datos no relacional:

La base de datos no relacional Neo4j constituye el principal repositorio del sistema y está diseñada para manejar estructuras de grafos complejas. Entre sus componentes esenciales, se encuentran los nodos, que representan variables climáticas dentro del sistema. Estos nodos se relacionan a través de relaciones que modelan influencias causales u otras dependencias específicas, lo que permite representar la interacción entre diferentes elementos del sistema. Además, Neo4j almacena reglas que definen las condiciones y acciones que regulan cómo interactúan los nodos y sus conexiones, proporcionando un marco dinámico para la evaluación y modificación del grafo.

Figura 13

Diseño de la base de datos no relacional



Los nodos principales, representados por el color azul en la Figura 13, se detallan a continuación.

Un **Proyecto** actúa como el contenedor principal, donde se definen proyectos con atributos fundamentales como su *project_id*, un identificador único; su *name* y *description*, que brindan contexto y el equipo asignado *team*. Dentro de cada proyecto, las **Versiones** sirven para capturar estados evolutivos del trabajo, con atributos que rastrean el *version_id* y el estado de revisión *review_status* para controlar la calidad del progreso. Estas versiones son el punto de partida para organizar el trabajo en secciones más manejables.

En cada versión, se encuentran los **Grafos**, que representan la estructura general de un diagrama, y cada uno se identifica con atributos como *graph_id*. Dentro de los gráficos, las **Secciones** permiten desglosar la información en unidades específicas, cada una con su propio *section_id*, nombre (*name*) y descripción (*description*). Para agrupar conceptos relacionados o secciones, los **Grupos** son organizados mediante atributos como su *group_id*, nombre y descripción. Por último, los **Componentes** representan los elementos más detallados del sistema:

cada componente tiene un identificador único (*component_id*), nombre, descripción y, si es relevante, información adicional como mediciones (*measurement*) o imágenes (*image*). Esta estructura no solo organiza el sistema, sino que crea un flujo claro que permite a los usuarios gestionar proyectos complejos de manera eficaz y comprensible.

Las relaciones entre estos nodos, representados por el color amarillo en la Figura 13, incluyen atributos como *date_created* y *date_modified*, lo que permite un seguimiento preciso del historial y la evolución de las conexiones. La decisión de incluir estas marcas temporales en las relaciones en lugar de en los nodos se justifica porque las conexiones representan dinámicas temporales y contextuales que pueden cambiar, mientras que los nodos son entidades estáticas. Este enfoque, respaldado por estudios sobre la flexibilidad de las bases de datos de grafos, optimiza la gestión de datos dinámicos en sistemas complejos (Dr. Dipali Meher, 2023).

Las relaciones se estructuran de manera que reflejan las interacciones clave dentro del sistema. Por ejemplo, las relaciones ***Tiene*** conectan entidades jerárquicamente, como Proyecto con sus versiones, y estas a su vez con grafos y secciones. De manera similar, las relaciones ***Pertenece*** permiten vincular grupos con componentes específicos, definiendo claramente los elementos que conforman cada agrupación. Finalmente, las relaciones ***Afecta*** representan influencias directas entre secciones o entre componentes, incorporando criterios de entrada (*entry_criteria*), salida (*exit_criteria*), lo que permite modelar la propagación de efectos entre elementos del sistema. Esta estructura jerárquica y relacional no solo organiza eficientemente los datos, sino que también proporciona una representación intuitiva de las dependencias y dinámicas del sistema (Debrouvier, Parod, & Matías, 2021).

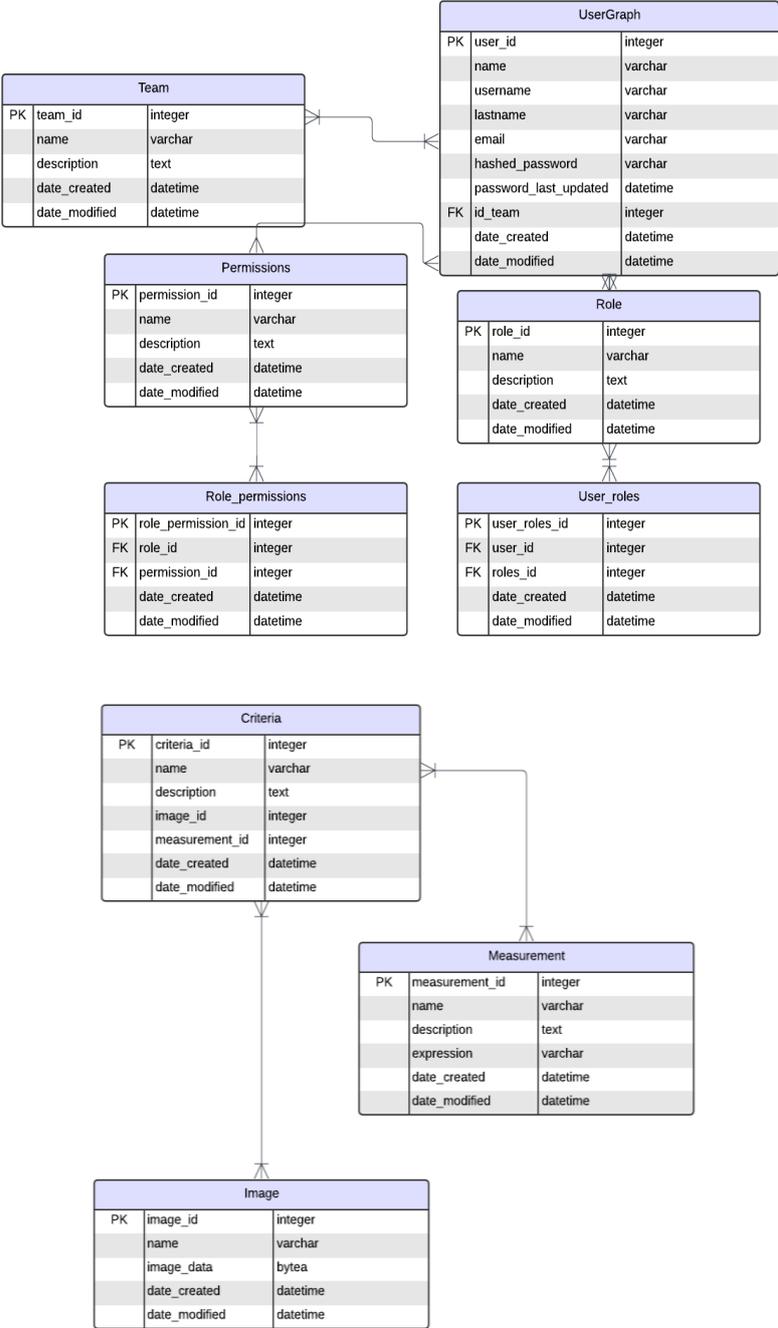
2.10.2 Diseño de base de datos relacional

La base de datos relacional complementa a la base de datos no relacional al gestionar datos administrativos, como credenciales, roles y permisos del sistema, que no están directamente relacionados con el diagrama DPSIR ni influyen en las variables climáticas. Estos datos son

fundamentales para definir las acciones que los usuarios pueden realizar dentro de la herramienta, asegurando un control preciso sobre el acceso y las operaciones permitidas.

Figura 14

Diseño de la base de datos relacional



En la Figura 14, se encuentra la tabla **Equipo**, que representa a los equipos con atributos fundamentales como *team_id*, que actúa como identificador único, *name* para almacenar el nombre

del equipo y *description* para ofrecer un contexto breve sobre sus funciones. Esta tabla organiza la base del sistema colaborativo, conectando múltiples usuarios con sus respectivos equipos.

La tabla **Usuario** extiende esta funcionalidad al gestionar la información de los usuarios. Cada usuario está identificado por un *user_id*, acompañado de información personal como *name*, *lastname*, y *correo electrónico*. La seguridad se prioriza mediante el atributo *hashed_password*, que almacena las contraseñas cifradas, y el campo *password_last_updated*, que rastrea cuándo se modificó por última vez. Los usuarios se relacionan con equipos a través del atributo *id_team*, creando un vínculo directo con la tabla **Equipo**, y con roles mediante la tabla **Roles de Usuario**, lo que permite asignar permisos específicos de forma organizada y centralizada.

En cuanto a la administración de acceso, el sistema implementa una lógica jerárquica basada en roles y permisos. La tabla **Rol** define los roles con atributos como *role_id*, *name*, y *description*, permitiendo agrupar permisos en niveles lógicos. Estos roles están relacionados con los permisos mediante la tabla intermedia **Permisos de Rol**, que gestiona la asignación de permisos a roles con un identificador único *role_permission_id*, campos de referencia como *role_id* y *permission_id*, y el atributo *date_assigned*, que registra la fecha de la asignación. A nivel de usuario, la tabla **Rol de Usuario** conecta usuarios con roles específicos, asegurando que las modificaciones se registren mediante el atributo *date_modified*, lo que garantiza trazabilidad y transparencia en la gestión de accesos.

El sistema también incluye funcionalidades avanzadas para manejar datos específicos. La tabla **Criterio** organiza criterios detallados con atributos como *criteria_id* y *name*, mientras que la tabla **Medida** almacena mediciones con soporte para fórmulas en el campo *expression*, añadiendo una capa de cálculo dinámico al sistema. Las imágenes, necesarias para enriquecer el contenido visual, se gestionan a través de la tabla **Imagen**, que almacena los datos binarios (*image_data*) junto con la fecha de creación, *date_created*.

Las tablas de la base de datos relacional están interconectadas para garantizar coherencia en el sistema. Por ejemplo, los equipos se relacionan con usuarios a través del campo *id_team*, los roles se conectan con permisos mediante **Permisos de Rol**, y los usuarios se vinculan con roles utilizando **Roles de Usuario**. Esta arquitectura modular e interconectada permite una administración robusta de usuarios, equipos y recursos, optimizando tanto la seguridad como la funcionalidad del sistema. La separación entre roles y permisos asegura una escalabilidad eficiente, como se respalda en la literatura sobre diseño de bases de datos para sistemas jerárquicos (Chen, Hou, & Wang, 2011).

Capítulo 3

El presente capítulo tiene como propósito exponer los resultados obtenidos durante la implementación y evaluación de la herramienta desarrollada. Se divide en cuatro secciones principales, cada una enfocada en un aspecto clave del proceso de implementación y validación de la solución: el plan de implementación, las pruebas realizadas, los resultados alcanzados y el análisis de costos.

3.1 Plan de implementación

El plan de implementación detalla las actividades realizadas durante las distintas etapas del proyecto desde el diseño inicial hasta la evaluación final. El cronograma del proyecto fue diseñado en torno a cinco fases clave: la Planeación y Recolección de Requisitos para definir los objetivos del sistema; el Diseño de la Solución, donde se desarrolló un prototipo interactivo; la Implementación, que abarcó la codificación de módulos esenciales como la gestión de grafos y la generación de reglas; las Pruebas y Validación, enfocadas en evaluar la funcionalidad y usabilidad del sistema; y terminamos con, la Entrega Final y Documentación.

3.2 Tiempo de desarrollo

Tabla 11

Cronograma de desarrollo por área

Área de desarrollo	Horas (aprox)	Desafíos	Soluciones
Frontend	80	Diseño interactivo y renderizado de grafos	Implementación con librerías y pruebas iterativas con usuarios
Backend	100	Manejo de reglas y sincronización de datos	Uso de Neo4j para grafos y microservicios para modularidad
Infraestructura	60	Configuración de entornos y despliegue	Identificación de librerías
Pruebas	20	Validación con usuarios	Mantener reuniones con usuarios

Documentación	40	Generar material completo	Documentación y revisiones en conjunto
----------------------	----	---------------------------	--

3.3 Uso de servicios externos y costos

Tabla 12

Servicios externos utilizados y sus planes

Servicio	Descripción	Plan	Justificación
Neo4J AuraDB	Base de datos orientada a grafos	Gratuito	Almacenamiento de grafos complejos para modelar relaciones causa-efecto
Supabase	Base de datos PostgreSQL	Gratuito (Plan Starter)	Proveer API para autenticación y almacenamiento de datos relacionales
FastAPI	Framework para construir APIs	Gratuito	Eficiencia en el desarrollo de endpoints y manejo de solicitudes HTTP

3.4 Requisitos mínimos y compatibilidad

El establecimiento de requisitos mínimos y compatibilidad para la herramienta se justifica considerando las características técnicas de los servicios externos utilizados. Estas herramientas requieren una plataforma con capacidades mínimas, como un procesador Intel i3 o equivalente y 4 GB de RAM, para manejar consultas complejas, múltiples procesos concurrentes y solicitudes HTTP sin afectar la experiencia del usuario. Un espacio de almacenamiento local de 500 MB asegura que las operaciones temporales, como el almacenamiento en caché, se realicen sin interrupciones, mientras que una conexión a internet de 10 Mbps garantiza una interacción fluida con los servicios.

Tabla 13*Requisitos mínimos y compatibilidad*

	Requisitos mínimos	Compatibilidad
Procesador	Intel i3 o equivalente	Windows, macOS
Memoria RAM	4GB	Windows 10+, macOS
Espacio en Disco	500 MB libres	Aplicaciones web compatibles con Chrome (Versión 60 o posterior), Firefox (Versión 60 o posterior), Safari (Versión 11 o posterior)
Red	Conexión a Internet de 10 Mbps	Soporte en redes locales

3.5 Pruebas

La metodología utilizada incluye un plan de pruebas estructurado que incluye los objetivos, las herramientas empleadas y los resultados obtenidos. El plan de pruebas también se encuentra documentado en los Apéndices para consulta detallada.

3.5.1 Objetivos

- Evaluar la usabilidad y efectividad de la herramienta Link-Graph en la gestión de reglas, mediante pruebas con usuarios y análisis de métricas de interacción, para determinar su eficiencia en la representación y manipulación de relaciones en sistemas complejos.
- Determinar si la herramienta facilita la comprensión y el modelado de relaciones causa-efecto en sistemas basados en el marco DPSIR, a través de estudios de caso y validaciones con expertos, para comprobar su usabilidad.
- Identificar áreas de mejora en la interfaz, funcionalidades y capacidades colaborativas del sistema, a partir de retroalimentación de usuarios y pruebas de usabilidad, para optimizar la experiencia de usuario y potenciar su aplicabilidad.

3.5.2 Planificación

- Fecha de inicio: 22 de enero de 2025
- Duración: 3 días laborales

3.5.3 Reclutamiento de voluntarios

3.5.3.1 Actores comunitarios:

- Personas inmersas en los sistemas socio ecológicos que dependen directamente de los recursos naturales para sus actividades productivas o de subsistencia.
- Personas provenientes de disciplinas relacionadas al campo ambiental.
- Personas responsables de tomar decisiones basadas en la ciencia para implementar políticas, reglas y protocolos.

3.5.3.2 Investigadores científicos:

- Profesionales que realizan investigación básica o aplicada, diseñan y ejecutan ensayos, y generan conocimiento sobre temas ambientales.
- Expertos que aplican su conocimiento ambiental para desarrollar soluciones prácticas y contribuir al bienestar de la sociedad.

3.5.4 Estrategia y lugar de reclutamiento

La estrategia de reclutamiento para los actores comunitarios se desarrolló a través de la identificación de contactos vinculados al proyecto Clim-Red.

Para los investigadores científicos, se contactó a personas con perfiles relacionados con las ciencias ambientales aplicadas, utilizando canales de difusión específicos para identificar expertos en el área. Las pruebas se llevaron a cabo de manera flexible y virtual, adaptándose a la disponibilidad de los participantes.

3.5.5 Grupo de tareas

La evaluación se dividió en dos grupos de tareas, ajustadas según el perfil de los participantes: Actores comunitarios e investigadores científicos

3.5.5.1 Grupo actores comunitarios

Con este grupo se adoptaron dos enfoques de apoyo. Primero, se proporcionó un contexto general sobre el uso de la herramienta y una explicación de los principios básicos antes de que los participantes realizaran las tareas, lo que permitió medir qué tan intuitiva resultaba la herramienta sin asistencia directa. Posteriormente, durante las tareas, se ofreció asistencia inmediata para resolver dudas y garantizar el correcto uso de la herramienta.

Las tareas que se evaluaron fueron:

- Crear un grafo con al menos tres secciones relacionadas, crear grupos y relacionar componentes.
- Crear dos reglas diferentes entre componentes.
- Generar un reporte basado en el análisis de la interacción entre dos componentes específicos.

Con sus métricas:

- Tiempo promedio necesario para completar las tareas (en minutos).
- Cantidad de errores en la creación de las reglas.
- Porcentaje de interacciones correctamente identificadas en el reporte

La combinación de las tareas y métricas nos da como resultado los aspectos evaluados a nivel general: Facilidad de uso, tiempo requerido para completar tareas y nivel de comprensión de funcionalidades de la herramienta.

3.5.5.2 Grupo investigadores científicos

El grupo de investigadores científicos está compuesto por profesionales y expertos en el ámbito del cambio climático, ciencias ambientales y áreas relacionadas. Estos participantes poseen experiencia en el análisis de datos ambientales, la evaluación de estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático.

Las tareas que se evaluaron fueron:

- Crear un grafo con al menos tres secciones relacionadas, crear grupos y relacionar componentes.
- Validar reglas definidas por actores comunitarios.
- Modificar un grafo existente en la herramienta para y guardar una versión mejorada.

Con sus métricas:

- Tiempo promedio necesario para completar las tareas (en minutos).
- Cantidad de errores en la validación de reglas.
- Retroalimentación cualitativa sobre la capacidad del sistema.

De forma similar a los actores comunitarios, se llevó a cabo un análisis detallado de la creación de grafos para evaluar el nivel de intuitividad de la herramienta. Este análisis incluyó la observación de errores cometidos durante las validaciones de reglas, proporcionando información sobre posibles áreas de confusión o dificultad para los usuarios. Al modificar un grafo y generar una nueva versión, se evaluó la capacidad de los usuarios para gestionar eficazmente la herramienta, con especial énfasis en el manejo de versiones y la adaptación a los cambios en la estructura del grafo.

3.5.6 Ejemplo de preguntas para cuestionario de usabilidad

A continuación, se presenta una selección de las preguntas más relevantes incluidas en el cuestionario de evaluación, diseñado para obtener retroalimentación clave de los usuarios sobre la herramienta. Estas preguntas se enfocaron en evaluar aspectos fundamentales como la facilidad de uso además de la utilidad de las visualizaciones y reportes mediante la escala de Likert. Se añadió una pregunta de satisfacción general de los participantes evaluada con respuestas si/no junto a su justificación.

Tabla 14*Preguntas de ejemplo del cuestionario de usabilidad*

Aspecto evaluado	Pregunta
Facilidad de uso	¿Qué tan intuitiva te pareció la interfaz de usuario?
Utilidad y Aplicabilidad	¿Qué tan útiles consideras las visualizaciones generadas por la herramienta para el análisis de escenarios?
Impacto en la Toma de Decisiones	¿Cómo calificarías la precisión y claridad de los reportes generados?
Satisfacción General	¿Recomendarías esta herramienta a otros usuarios con necesidades similares?

2.6 Resultados

En esta sección se exponen los resultados alcanzados. Se presentan gráficos/tablas que ilustran métricas de desempeño, añadiendo comparativas entre los objetivos planteados y los resultados logrados.

2.6.1 Grupo actores comunitarios

Tabla 15*Tiempo promedio para completar tareas del grupo actores comunitarios*

Tarea	Tiempo mínimo (min)	Tiempo máximo (min)	Tiempo promedio (min)
Crear un grafo con al menos tres secciones relacionadas	2,5	5,0	3,74
Crear un grafo plantilla y agregar grupos y componentes relacionados	2,0	4,0	3,07
Crear 2 reglas diferentes entre componentes	1,5	3,0	2,12
Generar un reporte	0,5	1,0	0,72

2.6.1.1 Precisión en identificar las relaciones claves

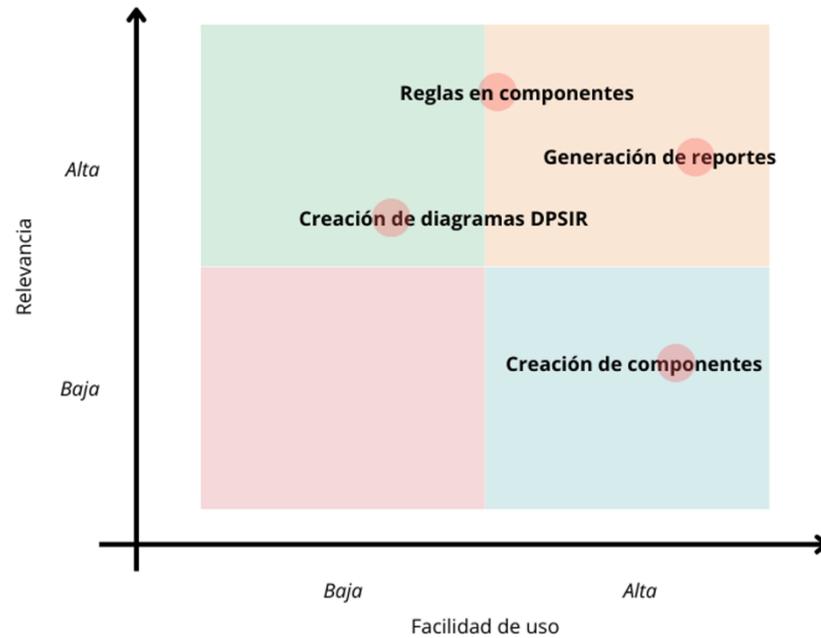
La herramienta evaluada tiene un gran potencial para identificar y trabajar con relaciones clave en la gestión de riesgos frente al cambio climático, ofreciendo funciones valiosas para este propósito. Si bien algunos aspectos, como el tamaño reducido de las conexiones y la falta de consistencia en ciertos botones, presentan oportunidades de mejora, estos son detalles que pueden ajustarse para optimizar la experiencia del usuario. La herramienta permite crear relaciones entre componentes y secciones, y este proceso podría simplificarse para hacerlo más intuitivo. Asimismo, se ha destacado que la relación entre secciones puede tener un impacto significativo en ciertos contextos, lo que ofrece una excelente oportunidad para adaptar y priorizar esta característica según las necesidades de los usuarios. Con ajustes menores, estas mejoras pueden potenciar aún más la capacidad de la herramienta para gestionar y representar relaciones complejas.

2.6.1.2 Funcionalidades

Entre las funcionalidades, se destaca la capacidad de incluir relaciones dentro de los componentes y generar reportes interconectados. No obstante, simplificar procesos, como la creación de componentes y la validación de reglas, hará que su uso sea más eficiente. Con esto, se podrá garantizar una experiencia de uso más fluida

Figura 15

Matriz de operacionalización de las funcionalidades más destacadas



La Figura 15 presenta una matriz de operacionalización de las funcionalidades más destacadas, evaluadas según su relevancia (eje vertical) y facilidad de uso (eje horizontal). Se observa que las funcionalidades más relevantes, como la generación de reportes y la implementación de reglas en componentes, se ubican en la zona superior derecha, indicando que son de gran importancia y cuentan con un nivel adecuado de usabilidad. Funciones como la creación de diagramas DPSIR presentan alta relevancia, pero menor facilidad de uso, lo que sugiere la necesidad de mejorar su accesibilidad e intuición.

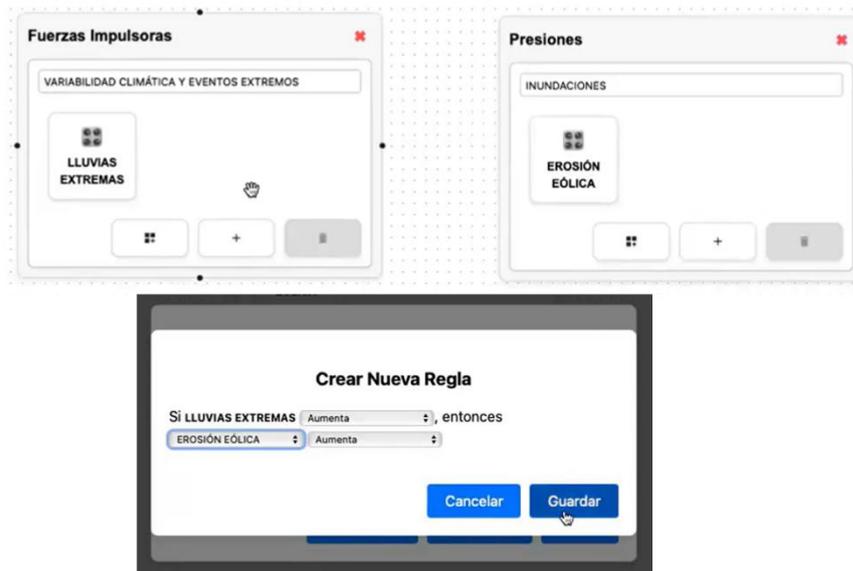
Estos resultados están respaldados por los comentarios de los usuarios, quienes destacan la facilidad de visualización e interacción con los componentes dentro de los reportes, pero, señalan que la comprensión inicial de los diagramas DPSIR resulta desafiante sin una explicación previa

2.6.1.3 Manejo de sistemas causa-efecto

La herramienta demuestra potencial para facilitar el manejo de sistemas causa-efecto, destacando su capacidad para generar relaciones entre componentes y representar conexiones en distintos escenarios.

Figura 16

Ejemplo básico de creación de un sistema causa-efecto



La Figura 16 forma parte de un ejemplo real de sistemas causa-efecto obtenido de las pruebas de la herramienta. En la categoría de fuerzas impulsoras (Drivers), se identifica el grupo variabilidad climática y eventos extremos, donde se crea el componente lluvias extremas, un fenómeno que se intensifica debido a cambios en los patrones de precipitación. Como resultado, en presiones (Pressures), se define el grupo inundaciones, que incluye el componente erosión eólica, ya que la saturación de suelos y la disminución de vegetación facilitan la pérdida de sedimentos por el viento.

El diseño manual de un esquema como este puede ser un proceso complejo y laborioso. Los usuarios mencionaron que requiere la identificación de múltiples relaciones causa-efecto, la organización de variables en niveles adecuados y la representación gráfica precisa de las interdependencias. Con LinkGraph, según los usuarios, la creación de estos modelos se optimiza permitiendo estructurar, visualizar y corregir relaciones sin ocupar una gran cantidad de tiempo.

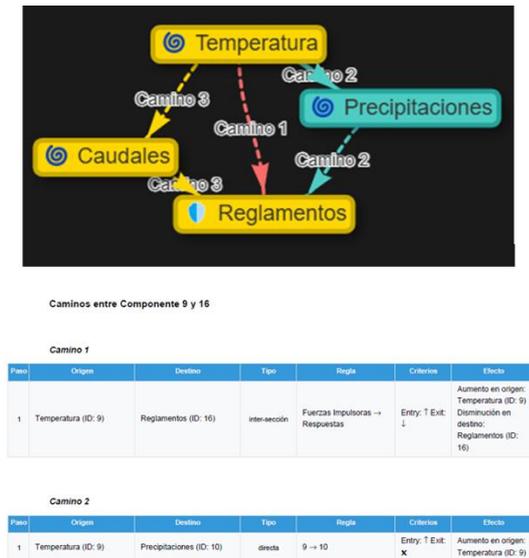
Se mencionó también, que el proceso de creación de relaciones puede ser más intuitivo, aun así, las funciones actuales permiten una visualización organizada de datos e interacciones.

2.6.1.4 Reportes

Los reportes generados permiten visualizar información de manera organizada y relevante para diferentes contextos.

Figura 17

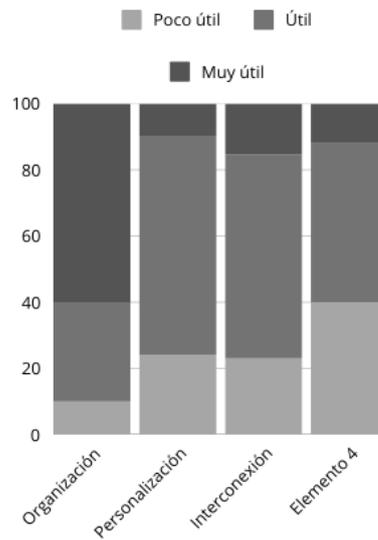
Ejemplos de reportes obtenidos de las pruebas



Se destacó tanto la utilidad del reporte interactivo como del reporte detallado, cada uno con ventajas complementarias en la visualización y comprensión de las relaciones entre los componentes. El reporte interactivo permitió a los usuarios explorar dinámicamente las conexiones entre variables facilitando la identificación visual de patrones y caminos en el sistema. El reporte detallado proporcionó información estructurada y precisa sobre las reglas aplicadas, los criterios de activación y los efectos específicos de cada relación. Se mencionó que incorporar opciones como la carga de imágenes y enriquecer la personalización de los reportes contribuirá a mejorar aún más su utilidad. Sin embargo, los usuarios valoraron positivamente esta funcionalidad.

Figura 18

Aspectos de valoración en los reportes



2.6.2 Grupo investigadores científicos

Tabla 16

Tiempo promedio para completar tareas del grupo investigadores científicos

Tarea	Tiempo mínimo (min)	Tiempo máximo (min)	Tiempo promedio (min)
Crear un grafo con al menos 3 secciones relacionadas	2,0	4,5	3,25
Relacionar un componente con otro	0,8	1,6	1,20
Validar reglas definidas por actores comunitarios	1,8	3,5	2,50
Modificar un grafo y guardar una versión mejorada	0,6	1,2	0,85

Los tiempos junto con el cuestionario de usabilidad, por cada participante, refleja dos patrones:

- Usuarios con puntuación $> 4/5$ en toma de decisiones dentro del cuestionario de usabilidad, fueron 25% más rápidos en validaciones complejas.

- Las tareas con mejor desempeño (relacionar/modificar) coinciden con funcionalidades mejor valoradas (4-5 puntos)

2.6.2.1 Precisión en validar y relacionar componentes

Si bien relacionar componentes demostró ser una tarea rápida que en promedio toma 1,4 minutos, esta rapidez contrasta con las observaciones cualitativas que señalan inconsistencias en botones y falta de claridad visual. Eso sugiere que se deberá hacer un análisis de consistencia en los íconos seleccionados, o proporcionar información dentro de la herramienta. Aunque la herramienta permite crear relaciones con agilidad, la ausencia de guías integradas para validaciones técnicas podría comprometer la solidez científica de los resultados, especialmente en contextos interdisciplinarios.

2.6.2.2 Creación de grafos y generación de nuevas versiones

La variabilidad en los tiempos de creación está directamente ligada a la curva de aprendizaje inicial, donde usuarios con menor afinidad técnica enfrentaron dificultades para mapear relaciones DPSIR jerárquicas. Sin embargo, la generación de versiones demostró ser un proceso robusto (0.8 minutos promedio), aprovechando la alta valoración de los reportes (4.75/5). En sí, la herramienta optimiza tareas técnicas (guardado, modificación), pero requiere reforzar los mecanismos de guiado conceptual durante la construcción inicial.

2.6.3 Descubrimientos generales de la encuesta de usabilidad

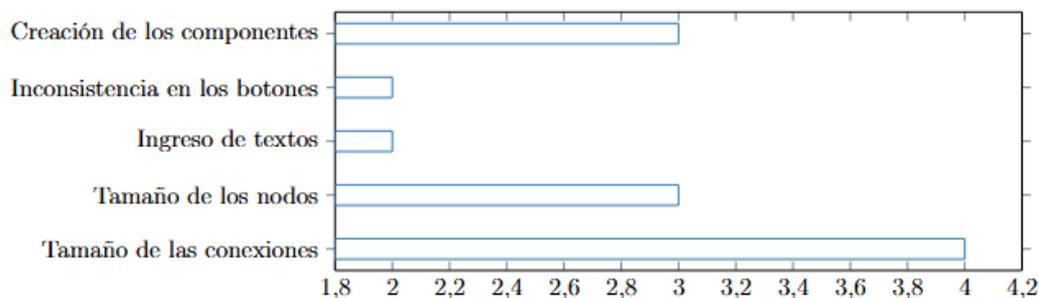
La distribución de experiencia técnica entre los usuarios, obtenida a partir de cuestionarios sobre su familiaridad con herramientas similares de análisis de grafos o visualización de datos con diagramas DPSIR, muestra que el 20% tiene experiencia alta, el 60% nivel medio y el 20% nula. Esto revela que la herramienta debe equilibrar profundidad analítica para expertos con accesibilidad para novatos. Por ejemplo, el 75% de los errores en la creación inicial de gráficos provinieron de los grupos de experiencia poca y media. Esto subraya la necesidad de implementar módulos de tutoriales interactivos para principiantes y atajos configurables para expertos. La

brecha identificada no solo afecta la eficiencia, sino que también podría limitar la adopción en comunidades no académicas, un objetivo clave del proyecto.

2.6.3.1 Principales dificultades reportadas

Figura 19

Detalle de puntuación de las principales dificultades reportadas



Los usuarios destacaron la capacidad técnica y el potencial de la herramienta, especialmente en tareas clave como la validación de reglas comunitarias, considerada relevante por el 100% de los participantes. Sin embargo, el tiempo de ejecución fue un 30% mayor al esperado, lo que indica oportunidades para optimizar procesos y explorar mejoras en la jerarquía visual. Este desfase pone de manifiesto que se podrían seguir realizando investigaciones para maximizar la usabilidad y eficiencia del sistema. Es aquí donde una guía inicial y personalización de imágenes emergen como necesidades para mejorar la adopción.

2.6.3.2 Impacto esperado en investigación

El impacto esperado en la investigación se refleja en la percepción positiva de los usuarios sobre la herramienta. Un 80% de los participantes mencionaron que mejora significativamente la organización de datos climáticos, mientras que un 60% destacó su potencial para fomentar la colaboración interdisciplinaria entre diferentes áreas del conocimiento. Además, un 40% resaltó su capacidad para facilitar la comunicación y el intercambio de información con comunidades locales, ampliando su alcance más allá del ámbito académico.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se presentan las conclusiones que sintetizan los resultados obtenidos y se reflexiona sobre la efectividad del sistema en la gestión de datos climáticos. Asimismo, en las recomendaciones se proponen mejoras orientadas a optimizar la experiencia del usuario, fortalecer la capacidad del sistema para modelar dinámicas más complejas y facilitar su integración en diversos entornos de análisis.

4.1.1 Conclusiones

- El desarrollo de la herramienta Link-Graph cumple con el objetivo de diseñar una interfaz intuitiva y centrada en el usuario para facilitar la creación de diagramas de relaciones causa-efecto. La integración de principios de usabilidad ha permitido desarrollar una interfaz intuitiva que facilita la creación de diagramas tanto para usuarios con formación científica como para aquellos sin experiencia técnica. Los resultados evidencian que las funcionalidades mejor valoradas entre 4 a 5 puntos, coinciden con las tareas de mejor desempeño como la modificación y relación de elementos, lo que refuerza la efectividad del diseño. Además, la creación de diagramas DPSIR es efectiva, con tiempos promedio de 3,74 minutos para actores comunitarios y 3,25 minutos para investigadores científicos. Se han identificado oportunidades de mejora en la jerarquía visual de para reducir las barreras técnicas. Sin embargo, la variabilidad en los tiempos de aprendizaje, especialmente en usuarios con menor afinidad técnica, resalta la necesidad de mejorar la jerarquía visual de elementos y fortalecer los mecanismos de guiado conceptual, tales como tutoriales (Apéndice E).
- La herramienta implementa un sistema dinámico de gestión de relaciones causa-efecto mediante grafos, permitiendo la validación de reglas y mejorando la precisión en la modelación de dinámicas climáticas. Los participantes confirmaron que la creación de

relaciones entre componentes y la definición de reglas son funcionales para la comprensión de sistemas complejos. En promedio, la creación de un grafo con secciones relacionadas toma aproximadamente 3,74 minutos para actores comunitarios y 3,25 minutos para científicos investigadores, evidenciando que la familiaridad con herramientas similares impacta en la eficiencia. No obstante, se identificaron desafíos en la construcción inicial de relaciones DPSIR jerárquicas, particularmente en usuarios con menor experiencia, quienes representaron el 75% de los errores en la fase de creación.

- Las métricas de desempeño y las pruebas prácticas confirman que el software desarrollado contribuye a mejorar la comprensión de las interacciones climáticas y apoya la toma de decisiones orientadas a la adaptación y mitigación del cambio climático. La generación de reportes, con un tiempo promedio de 0,72 minutos, fue una de las funcionalidades mejor valoradas, destacándose el reporte interactivo por su capacidad de visualizar dinámicamente conexiones y el reporte detallado por estructurar reglas y efectos. El 80% de los usuarios destacó la herramienta como un soporte útil en la organización de información, mientras que el 60% resaltó su capacidad para fomentar la colaboración interdisciplinaria. La evaluación de usabilidad mostró que usuarios con mayor puntuación en toma de decisiones fueron un 25% más rápidos en validaciones complejas, lo que sugiere que la herramienta mejora la eficiencia en análisis especializados.

- Los resultados reflejan que Link-Graph es una solución efectiva para la administración de grafos en la gestión de relaciones causa-efecto en el contexto del cambio climático resiliente. La funcionalidad de actualización dinámica de diagramas permite estructurar y modificar relaciones sin requerir largos procesos manuales, optimizando el análisis y la visualización de interacciones entre variables. Sin embargo, la curva de aprendizaje varía entre usuarios, lo que refuerza la necesidad de desarrollar módulos de

tutoriales interactivos y atajos configurables que faciliten la experiencia tanto a principiantes como a expertos.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda optimizar la jerarquía visual de la herramienta, ampliando el tamaño de los nodos y conexiones para facilitar la navegación y garantizar la consistencia de botones e íconos mediante etiquetas claras. Este rediseño deberá enfocarse en mejorar la experiencia tanto de usuarios principiantes como avanzados, promoviendo un acceso intuitivo y eficiente.

- Es fundamental desarrollar tutoriales interactivos y módulos personalizados que guíen a los usuarios en el uso de la herramienta que proporcione una guía detallada con ejemplos prácticos y pasos claros para realizar tareas clave dentro de la herramienta. Su objetivo sería reducir la curva de aprendizaje y facilitar el uso de la plataforma, especialmente para aquellos usuarios con menor experiencia técnica. Un tutorial similar se encuentra disponible en el Apéndice F.

- Se recomienda permitir la configuración de atajos y la integración de elementos personalizados, como la posibilidad de añadir imágenes y notas a los reportes generados. Estas funcionalidades no solo mejorarían la flexibilidad de la herramienta, sino que también fortalecerían su capacidad de adaptarse a las necesidades específicas de los usuarios.

- La integración de números difusos en futuros desarrollos podría mejorar la representación de incertidumbre en la modelación de interacciones climáticas. La lógica difusa permitiría asignar grados de pertenencia a variables y relaciones dentro del sistema, facilitando un análisis más flexible y realista de los efectos ambientales. Esto optimizaría la interpretación de los diagramas DPSIR al permitir evaluaciones de impacto en términos de rangos y niveles de influencia, en lugar de depender exclusivamente de valores deterministas

Referencias

- Ahmed, R., & Navathe, S. (s.f.). Version control and management in computer-aided design databases.
- Alcalá, R., Casillas, J., Cordon, O., & Herrera, F. (2001). Building fuzzy graphs: Features and taxonomy of learning for non-grid-oriented fuzzy rule-based systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*.
- Andras Bardossy, L. D. (s.f.). Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological, and Engineering Systems. 256. doi:<https://doi.org/10.1201/9780138755133>
- Antoniou, G., & Harmelen, F. v. (2004). *A Semantic Web Primer*. The MIT Press.
- B. Meester, P. H. (2020). RDF graph validation using rule-based reasoning. *Semantic Web*, 117-142. doi: <https://doi.org/10.3233/sw-200384>
- Barry Ness, S. A. (2010). Structuring problems in sustainability science: The multi-level DPSIR framework. *Geoforum*, 479-488. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.12.005>
- Boncheva, A. (2013). El cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe Evaluativo del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2007). The Unified Modeling Language User Guide. *Addison-Wesley Professional*.
- Chen, Y., Hou, K., & Wang, R. (2011). A Workflow-Based Cooperative Project Management System. *2011 10th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*.
- Cravero, A. a. (10 de 2020). Big Data Architectures for the Climate Change Analysis: A Systematic Mapping Study. *IEEE Latin America Transactions*, 1793-1806. doi:10.1109/TLA.2020.9387671
- Cravero, A. S. (2020). Big Data Architectures for the Climate Change Analysis: A Systematic Mapping Study. *IEEE Latin America Transactions*, 1793-1806. doi:<https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387671>
- D. Rawat, N. K. (2017). Graph Database: A Complete GDBMS Survey.
- Debrouvier, A., Parod, E., & M. P. (2021). A model and query language for temporal graph databases. *The VLDB Journal*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00778-021-00675-4>.
- Dr. Dipali Meher, D. P. (2023). Learning Graph Databases: Neo4j an overview. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. doi:<https://doi.org/10.33564/ijeast.2023.v08i02.033>.

- Eichner, C., Gladisch, S., Schumann, H., & Tominski, C. (2016). Direct Visual Editing of Node Attributes in Graphs. doi:<https://doi.org/10.3390/informatics3040017>
- Faiz, M. &. (2016). Data synchronization in distributed client-server applications. *2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*. doi:<https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569323>.
- Fildes, R., & Kourentzes, N. (2011). Validation and forecasting accuracy in models of climate change. *International Journal of Forecasting*, 968-995. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2011.03.008>
- Gabrielsen, P. &. (2003). *Environmental indicators: Typology and use in reporting*. European Environment Agency. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu>
- Gavriellov-Yusim, N., & Friger, M. (2013). Use of administrative medical databases in population-based research. doi:<https://doi.org/10.1136/jech-2013-202744>.
- H. Kiendl, M. K. (1991). Rule-Based Modelling of Dynamical Systems.
- Hermann, F., Ehrig, H., Orejas, F., Czarnecki, K., Diskin, Z., Xiong, Y., . . . Engel, T. (2015). Model synchronization based on triple graph grammars: correctness, completeness and invertibility. 241–269.
- Hong, S. (2023). Figma, A Study on the Utilization of UI/UX Design Education: Focusing on Figma. *Korea Institute of Design Research Society*. doi:<https://doi.org/10.46248/kidrs.2023.2.34>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- J. Phillips, W. S. (2015). Graph theory in the geosciences. *Earth-Science Reviews*.
- Jorge Herrera Murillo, J. F. (2017). Desarrollo de inventarios de emisiones de gases efecto invernadero, una herramienta de apoyo en la agenda local de cambio climático: Caso San José.
- Karen Tscherning, K. H. (2012). Does research applying the DPSIR framework support decision making? *Land Use Policy*, 102-110.
- Korff, M. (2005). Application of graph grammars to rule-based systems. 505–519.
- Kristensen, P. (2004). The DPSIR Framework.
- Latendresse, M. &. (2011). Web-based metabolic network visualization with a zooming user interface. *BMC Bioinformatics*. doi:<https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-176>.
- Latendresse, M., & Karp, P. D. (2011). Web-based metabolic network visualization with a zooming user interface. *BMC Bioinformatics*.

- Lotfi, M., Osório, G. J., Javadi, M. S., Ashraf, A., Zahran, M., & Samih, G. (2021). A Dijkstra-Inspired Graph Algorithm for Fully Autonomous Tasking in Industrial Applications. 5448 - 5460. doi:10.1109/TIA.2021.3091418
- Marcus, A. (2001). Cross-cultural user-interface design for work, home, play, and on the way. *Proceedings of the 19th annual international conference on Computer documentation*, 221 - 222. doi:https://doi.org/10.1145/501516.501560.
- Mark Scott, S. J. (2017). Metagit: Decentralised metadata management with Git. *Inf. Syst.*
- Marta Ferreira, N. N. (2024). Connecting audiences with climate change: Towards humanised and action-focused data interactions. *International Journal of Human-Computer Studies*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103341
- Maxwell, T. P. (2012). Exploratory Climate Data Visualization and Analysis Using DV3D and UVCDAT. *2012 SC Companion: High Performance Computing, Networking Storage and Analysis*.
- Mendel, J., & Pak, R. (2009). The Effect of Interface Consistency and Cognitive Load on User Performance in an Information Search Task. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. doi:https://doi.org/10.1177/154193120905302206
- Mishchenko, O. S. (2010). Distributed visualization framework architecture. *Proceedings of SPIE*. doi:https://doi.org/10.1117/12.838702.
- Mohammad Faiz, U. S. (2016). Data synchronization in distributed client-server applications. *2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*. doi:https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569323.
- Navarra, C., Vrotsou, K., Opach, T., Joling, A., Wilk, J., & Naset, T.-S. (2021). A progressive development of a visual analysis interface of climate-related VGI. doi:https://doi.org/10.1007/s12665-021-09948-1.
- Nocke, T., Flechsig, M., & Bohm, U. (2007). Visual exploration and evaluation of climate-related simulation data. *2007 Winter Simulation Conference*. doi:https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419664.
- O. Mishchenko, S. R. (2010). Distributed visualization framework architecture. *Distributed visualization framework architecture*. doi:https://doi.org/10.1117/12.838702
- Oliveira, G. M., & Monteiro, I. T. (2023). Development and evaluation of the plugin for Figma for Accessibility Documentation for Interfaces - DAI. *Proceedings of the XXII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*.

- Olmedo, F. G., Valderrama, J. M., & González, M. B. (s.f.). Fundamentos e implicaciones del cambio climático. Una visión global. *Revista de responsabilidad social de la empresa*, 17-54.
- Patrício, J. E. (2016). DPSIR—Two Decades of Trying to Develop a Unifying Framework for Marine Environmental Management? *Frontiers in Marine Science*, 1-14.
doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00177>
- Phillips, J. D., Schwanghart, W., & Heckmann, T. (2015). Graph theory in the geosciences. *Earth-Science Reviews*, 147-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.02.002>
- Piers M. Forster, C. J. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*. doi:<https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- Poulter, B., Goodall, J. L., & Halpin, P. N. (2008). Applications of network analysis for adaptive management of artificial drainage systems in landscapes vulnerable to sea level rise. *Journal of Hydrology*, 207-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.022>
- Press, C. U. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) Recuperado el 2024, de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- R. Hansell, I. C. (s.f.). PREDICTING CHANGE IN NON-LINEAR SYSTEMS. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- R. Knutti, M. R. (2015). Feedbacks, climate sensitivity and the limits of linear models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- Richardson, J. R. (2023). William Steffen (1947–2023). *Science*, 380(245).
doi:<https://doi.org/10.1126/science.adh9882>
- S. Kane, J. S. (2000). Linking Adaptation and Mitigation in Climate Change Policy. *Climatic Change*.
- Smeets, E. &. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. European Environment Agency. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu>
- Steed, C. A., Evans, K. J., Harney, J. F., Jewell, B. C., Shipman, G., & Smith, B. E. (2014). Web-based visual analytics for extreme scale climate science. *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*.
doi:<https://doi.org/10.1109/BIGDATA.2014.7004255>.
- Tizghadam, A., & Leon-Garcia, A. (2010). Betweenness centrality and resistance distance in communication networks. *IEEE Network*, 10 - 16. doi:10.1109/MNET.2010.5634437

- Tomoto, Y., Ohira, T., & Nakamura, T. (2010). Applying Multi-valued Decision Diagram to Visualization of If-Then Rules.
- U. Baldos, M. C. (2023). Global-to-local-to-global interactions and climate change. *Environmental Research Letters*.
- Uris Lantz C Baldos, M. C. (2023). Global-to-local-to-global interactions and climate change. *Environmental Research Letters*, 18. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc95c>
- Watson, B. B. (2008). Matrix depictions for large layered graphs.
- WRI. (s.f.). Local Knowledge and Climate Adaptation. *World Resources Institute*.
- Y. Wang, M. C. (2012). Version Control for Metadata in unified database console. *2012 6th International Conference on New Trends in Information Science, Service Science and Data Mining (ISSDM2012)*.
- Zhang, T., Li, J., Liu, Q., & Huang, Q. (2016). A cloud-enabled remote visualization tool for time-varying climate data analytics. *Environmental Modelling & Software*, 513-518. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.033>.

Apéndice A

En este apéndice se detallan las pruebas realizadas para evaluar el rendimiento de la herramienta, junto con las especificaciones del equipo utilizado durante dichas pruebas. El objetivo es validar el cumplimiento de los tiempos de respuesta y la fluidez gráfica esperados. A continuación, se describen las condiciones de las pruebas, los resultados esperados y los resultados reales obtenidos, contrastando el desempeño del sistema con los umbrales establecidos.

Especificaciones del equipo utilizado para las pruebas de la herramienta:

Procesador: Intel Core i5-1135G7 (11th Gen, 4 núcleos y 8 hilos, 2.4 GHz base, turbo hasta 4.2 GHz). **Memoria RAM:** 12 GB (11.8 GB utilizable), suficiente para manejar aplicaciones y tareas del navegador. **Sistema operativo:** Windows 11 Home (23H2), optimizado para aplicaciones modernas. **Herramienta de prueba:** Herramientas de desarrollo del navegador (Desempeño en navegadores en Chrome/Firefox).

Resultados esperados al analizar el rendimiento:

1. **Tiempos de respuesta:** Durante las operaciones probadas (acercamiento/alejamiento, filtros, etc.), deberían estar por debajo del umbral de <2 segundos, dependiendo del nivel de optimización de la aplicación. Como se señaló en el documento, el sistema garantiza un rendimiento óptimo incluso al gestionar diagramas con más de 500 nodos y conexiones. Esto se logra al asegurar una complejidad temporal de $O(n \log n)$ para consultas de recorrido, como búsquedas en grafos, y de $O(1)$ para operaciones de acceso local, como la recuperación directa de nodos en memoria.
2. **FPS (Frames por segundo):** Durante las interacciones, el rendimiento gráfico se debe mantener estable en >30 FPS, alcanzando 60 FPS en navegadores modernos.

Resultados reales de las pruebas de rendimiento:

Operaciones probadas: Alejamiento/Acercamiento en gráficos interactivos. Aplicación de filtros dinámicos. Exploración y navegación entre datos.

Tiempos de respuesta:

- **Alejamiento/Acercamiento:** 1.5 segundos (dentro del umbral de <2 segundos).
- **Aplicación de filtros:** 1.8 segundos (dentro del umbral de <2 segundos).
- **Navegación entre datos:** 1.6 segundos (dentro del umbral de <2 segundos).

Frames por segundo (FPS):

- **Promedio:** 50 FPS durante las pruebas. **Picos mínimos:** 42 FPS en gráficos complejos con múltiples nodos. **Observación:** Los gráficos integrados Intel Iris Xe ofrecieron un rendimiento fluido, con una visualización estable en tiempo real.

Apéndice B

A continuación, se presentan historias de usuario no detalladas en el cuerpo del documento, las cuales complementan el análisis de requerimientos y brindan una visión más amplia de las necesidades y expectativas de los usuarios finales del sistema.

Tabla 17

Historia de usuario FT-001

Historia FT-001: Usuario, Consulta de Diagramas	
Característica / Funcionalidad	Como usuario, necesito consultar un diagrama existente.
Razón / Resultado	Con la finalidad de visualizar las relaciones entre los componentes y entender las interacciones del sistema.
Criterio de aceptación	El sistema debe mostrar los componentes y relaciones del diagrama de forma clara e interactiva.
Contexto	En caso de que el usuario desee analizar o explorar un diagrama.
Evento	Cuando el usuario solicita un diagrama específico.
Resultado / Comportamiento esperado	El sistema realiza la consulta al servidor y devuelve el diagrama para su visualización en el cliente.

Tabla 18

Historia de usuario FT-002

Historia FT-002: Usuario, Autenticación y Permisos	
Característica / Funcionalidad	Como usuario, necesito iniciar sesión en el sistema utilizando mis credenciales.
Razón / Resultado	Con la finalidad de acceder a las funcionalidades y diagramas asignados según mis permisos.
Criterio de aceptación	El sistema verifica las credenciales ingresadas y permite el acceso únicamente si son válidas.
Contexto	En caso de que un usuario desee acceder al sistema o consultar su rol asignado.
Evento	Cuando el usuario introduce sus credenciales en el sistema.

Resultado / Comportamiento esperado	El servidor consulta la base relacional para verificar las credenciales y permisos, y devuelve la autorización correspondiente.
--	---

Tabla 19

Historia de usuario FT-003

Historia FT-003: Usuario, Ejecución de reglas	
Característica / Funcionalidad	Como usuario, necesito definir y aplicar una regla al diagrama.
Razón / Resultado	Con la finalidad de evaluar cómo afectan ciertas condiciones a los componentes del diagrama.
Criterio de aceptación	El sistema debe guardar la regla definida, ejecutarla en el diagrama y mostrar los resultados obtenidos.
Contexto	En caso de que el usuario desee establecer reglas para análisis o simulaciones específicas.
Evento	Cuando el usuario define una regla nueva.
Resultado / Comportamiento esperado	El servidor guarda la regla en Neo4j y la ejecuta, reflejando los cambios en el grafo si corresponde.

Tabla 20

Historia de usuario FT-004

Historia FT-004: Usuario, Registro de cambios	
Característica / Funcionalidad	Como usuario, necesito que los cambios realizados en el grafo sean registrados.
Razón / Resultado	Con la finalidad de rastrear modificaciones y revertir cambios si es necesario.
Criterio de aceptación	Cada modificación debe generar una nueva versión del grafo.
Contexto	En caso de que un usuario modifique componentes, reglas o jerarquías del diagrama.
Evento	Cuando el usuario guarda un cambio en el diagrama.

Resultado / Comportamiento esperado	El sistema registra la modificación como una nueva versión en servidor.
--	---

Apéndice C

En este apéndice se describen los principios de diseño que, aunque no fueron mencionados de manera explícita en el cuerpo del documento, resultan fundamentales para complementar y enriquecer el proyecto. Estos principios abarcan aspectos clave como la flexibilidad, la eficiencia, la accesibilidad y la legalidad, asegurando que el sistema sea escalable, inclusivo, eficaz y conforme a las normativas vigentes. Su inclusión refuerza la solidez del diseño y la adaptabilidad del sistema a diversos contextos y necesidades.

Principios de Flexibilidad

La herramienta está diseñada para garantizar la escalabilidad y flexibilidad en el manejo de datos complejos. Utilizar bases de datos gráficas, que optimizan el manejo de relaciones causales y grandes volúmenes de datos mediante consultas eficientes y una robusta indexación permite que el sistema se adapte fácilmente a escenarios de alta demanda o crecimiento en la cantidad de nodos y relaciones (A. Dubrovin, 2021).

Principios de Eficiencia

La gestión de versiones en el sistema incorpora herramientas avanzadas que destacan las diferencias entre versiones de diagramas mediante etiquetas claras y vistas comparativas (Arne Schipper, 2009).

Principios de Accesibilidad

El diseño del sistema incluye estrategias para garantizar la accesibilidad visual y funcional, tales como ajustes en el contraste, compatibilidad con lectores de pantalla y adaptaciones para dispositivos móviles. Estas características se alinean con estándares como las directrices de Chartability, que fomentan la creación de visualizaciones inclusivas mediante el uso de adaptaciones gráficas avanzadas, facilitando su uso por parte de audiencias diversas (Frank Elavsky, 2022).

Legalidad

El sistema cumplirá con normativas de protección de datos como GDPR y CCPA en caso de almacenar datos de usuarios (LE01). De la misma manera, se garantizará que las licencias de software de terceros sean compatibles con la distribución del producto final (LE02).

Apéndice D

En las entrevistas y cuestionarios realizados como parte de la evaluación del prototipo de Link-Graph, se recopilaron datos cualitativos y cuantitativos de los participantes, divididos en dos grupos: especialistas en ciencias climáticas y miembros de la comunidad general. A continuación, se detallan los aspectos clave y resultados obtenidos:

- **Especialistas en ciencias climáticas:** Los cinco participantes del grupo técnico destacaron la relevancia del sistema para investigaciones científicas, identificando que su principal fortaleza radica en la visualización de relaciones complejas dentro del marco DPSIR. Sin embargo, se sugirió incluir funciones avanzadas de personalización para ajustar gráficos y reportes a las necesidades de cada usuario.
- **Comunidad general:** Los cinco participantes sin experiencia técnica valoraron la interfaz como accesible, pero señalaron que la curva de aprendizaje inicial podría reducirse con tutoriales interactivos. Destacaron el valor educativo de las visualizaciones, especialmente para comprender cómo las fuerzas motrices y las presiones influyen en los impactos climáticos.

PLAN DE EVALUACIÓN: AUTORES COMUNITARIOS

Nombre:

Edad:

Carrera o profesión:

Experiencia previa en el uso de herramientas similares (Software de análisis de grafos o visualización de datos) *Check en el box correspondiente.*

Suelo trabajar mucho con herramientas similares	
He observado y conozco, pero no estoy familiarizado	
Experiencia Nula	

Dada la escala del 1-5. Siendo 1 nada favorable y 5 totalmente favorable. Resalta:

1. ¿Qué tan intuitiva te pareció la interfaz de usuario?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

2. ¿Te resultó fácil aprender las funcionalidades básicas de la herramienta?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

3. ¿Consideras que la herramienta facilita la comprensión de las relaciones entre variables en sistemas complejos?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

4. ¿Qué tan útiles consideras las visualizaciones generadas por la herramienta para la gestión de escenarios?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

5. ¿La herramienta permitirá mejorar la capacidad para identificar patrones clave en el sistema analizado?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

6. ¿Cómo calificarías la importancia de los reportes generados?

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

7. ¿Tuviste dificultades para realizar tareas específicas, como crear nodos, aplicar reglas o entender el reporte?

8. ¿Qué funcionalidades te parecieron más relevantes y cuáles menos útiles?

9. ¿Qué impacto consideras que tendría esta herramienta en tu trabajo de investigación?

10. ¿Qué mejorarías de la herramienta acorde a tus necesidades en el proyecto?

11. ¿Qué opiniones tienes de la visión a futuro que se tiene del proyecto?

APÉNDICE E

Como parte del proceso de validación del prototipo de la herramienta Link-Graph, se realizaron evaluaciones con distintos actores clave involucrados en el proyecto. Estas evaluaciones permitieron obtener retroalimentación sobre la usabilidad, accesibilidad y efectividad de la herramienta en la representación de relaciones causa-efecto dentro del marco DPSIR. Se contó con la participación de personas con distintos niveles de experiencia en ciencias climáticas y teoría de grafos, lo que permitió evaluar el prototipo desde diversas perspectivas.

A continuación, se reconoce y agradece a las siguientes personas por su colaboración en este proceso:

Fase de evaluación	Grupo de participantes	Nombres
Evaluación inicial	Comunidad sin experiencia en ciencias climáticas (evaluación de accesibilidad, intuitividad y valor educativo)	Javier Aguirre, Christopher Cedeño, Joffre Sisalima, Neyli Jiménez, Josseline Moreira
Evaluación inicial	Especialistas en ciencias climáticas (experiencia en cambio climático, modelado de sistemas complejos o análisis de datos ambientales)	Derly Mieles, Javier Billalva, Melissa, Ana Reyes, Melina
Evaluación final	Grupo de actores comunitarios (personas provenientes de disciplinas relacionadas al campo ambiental)	Julio Tinoco, Derly Mieles, Gianella Bravo, Victoria Rosado
Evaluación final	Investigadores científicos (profesionales dedicados a la investigación en temas climáticos)	Wilson Lafuente, Ana Reyes, Melina, Melissa

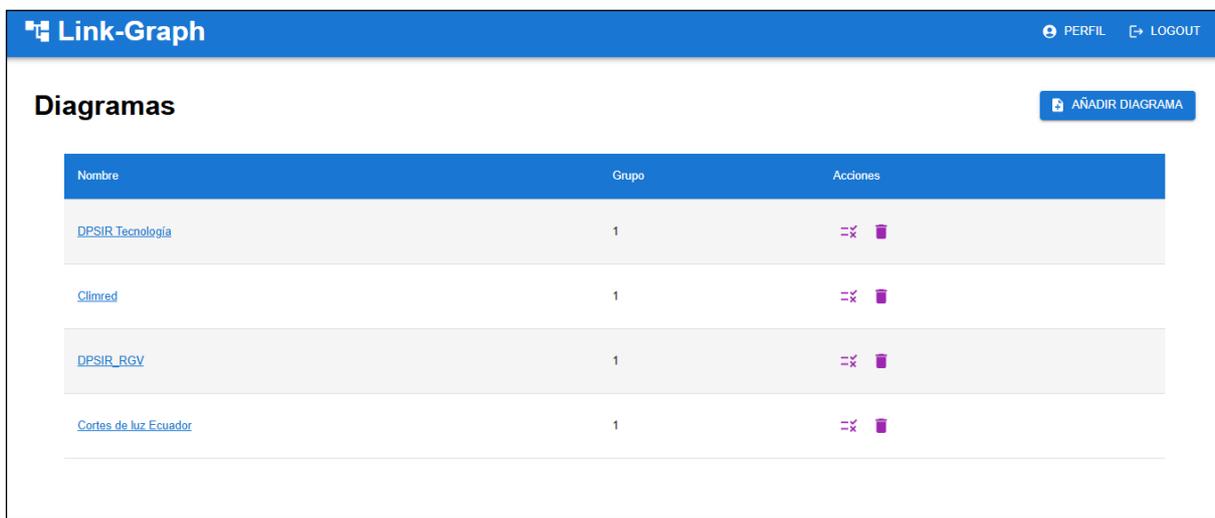
Apéndice F

A continuación, se presenta el manual de usuario básico de la herramienta Link-graph:

Link-Graph es una herramienta diseñada para la administración y gestión de diagramas basados en el marco DPSIR. Permite visualizar y analizar relaciones causa-efecto en distintos contextos, facilitando la toma de decisiones y el manejo de información compleja.

Este manual de usuario proporciona una guía básica para la utilización de la herramienta, enfocándose en la gestión de diagramas.

Pantalla de Inicio - Administración de Diagramas



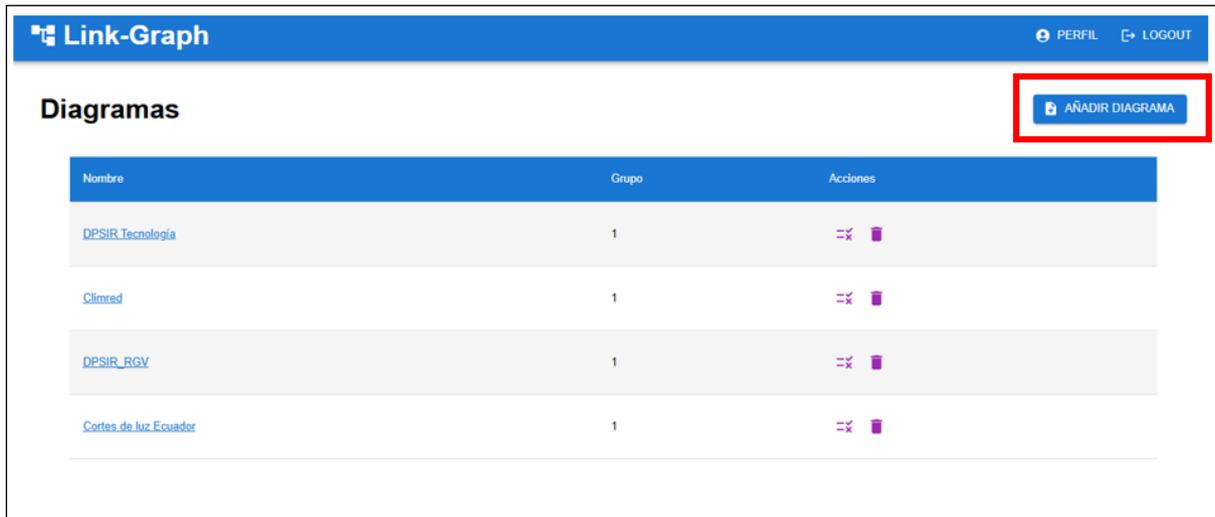
Al ingresar a Link-Graph, se muestra la pantalla principal de administración de diagramas, donde el usuario puede ver una lista de diagramas previamente creados.

Elementos principales:

- **Lista de diagramas:** Se muestra el nombre del diagrama, el grupo al que pertenece y las acciones disponibles.
- **Botón "Añadir Diagrama":** Permite crear un nuevo diagrama desde cero.
- **Opciones de usuario (Perfil y Logout):** Ubicadas en la parte superior derecha para gestionar la sesión.
- **Acciones sobre diagramas:**
 - **Eliminar** (icono de bote de basura).

Añadir un Diagrama

Para agregar un nuevo diagrama, se debe hacer clic en el botón "Añadir Diagrama" ubicado en la parte superior derecha de la pantalla.



Pasos:

1. Hacer clic en el botón "Añadir Diagrama".
2. Se abrirá una nueva ventana o formulario para ingresar los datos del diagrama.

The screenshot shows a modal window titled 'Nuevo Diagrama'. It contains the following elements:

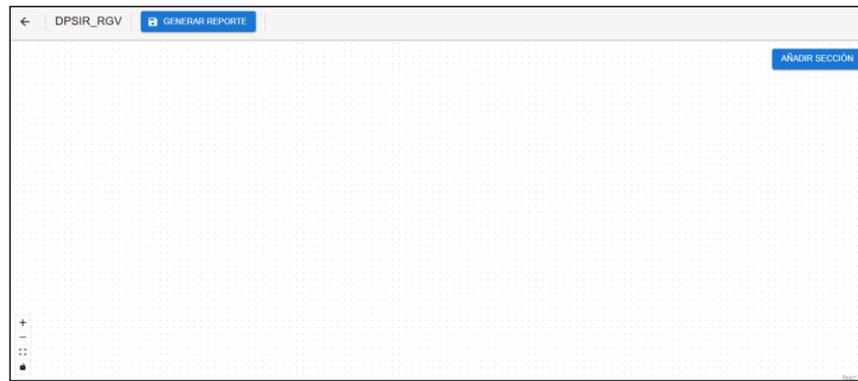
- A text input field labeled 'Nombre'.
- A text input field labeled 'Descripción'.
- A section titled 'Seleccione una plantilla:' with three options:
 - En blanco**: Represented by a document icon.
 - Plantilla con conexiones**: Represented by a network icon.
 - Plantilla sin conexiones**: Represented by a three-dot icon.
- At the bottom right, there are two buttons: 'CANCELAR' (in purple) and 'CREAR' (in grey).

3. Completar los campos requeridos, como:
 - **Nombre del diagrama:** Asignar un título representativo.
 - **Descripción:** Describir el diagrama (si aplica).
4. Seleccionar una de las tres opciones: En blanco, Plantilla con conexiones o plantilla sin conexiones.
5. Confirmar la creación del diagrama haciendo clic en "Crear".
6. El nuevo diagrama aparecerá en la lista de diagramas disponibles.

En la siguiente sección se detallará el proceso de edición y configuración de los diagramas creados.

Creación y Edición de Diagramas

Una vez añadido un diagrama, se visualizará un espacio de trabajo tipo "whiteboard" donde se podrá construir y personalizar el diagrama.

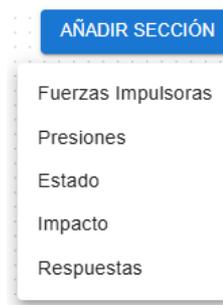


Elementos principales:

- **Área de trabajo:** Espacio donde se agregan y conectan los elementos del diagrama.
- **Botón *Generar Reporte*:** Permite exportar o visualizar un informe basado en el diagrama creado.
- **Botón *Añadir Sección*:** Facilita la incorporación de nuevas áreas o elementos dentro del diagrama.
- **Herramientas de acercamiento/alejamiento y bloqueo:** Permiten acercar/alejar la vista y bloquear la posición de los elementos para evitar modificaciones accidentales.

Pasos para Crear un Diagrama:

1. Hacer clic en *Añadir Sección* para insertar una sección en la pizarra.



2. Personalizar las secciones según las necesidades del usuario.



3. Ajustar la visualización con las herramientas de alejamiento/acercamiento y bloqueo.
4. Guardar los cambios y generar reportes si es necesario utilizando el botón *Generar reporte*.

En la siguiente sección se detallará el proceso de personalización y gestión avanzada de los diagramas creados.

Generación de Reportes

La herramienta permite generar reportes basados en los elementos seleccionados dentro del diagrama.

Pasos para Generar un Reporte:

1. Hacer clic en el botón *Generar Reporte* ubicado en la parte superior de la pantalla.



2. Seleccionar los dos componentes que formarán la base del reporte (por ejemplo, Marea y Tierra).



3. Confirmar la selección y hacer clic en *Generar*.
4. Si se desea cancelar el proceso, hacer clic en *Cancelar*.
5. Una vez generado, el reporte estará disponible para revisión o exportación, en formato PDF y HTML

Esta funcionalidad permite analizar la relación entre distintos elementos del diagrama de manera estructurada y documentada.