



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Procesos de aprendizaje en el análisis de sostenibilidad en sistemas socio-ecológicos de cuenca: un enfoque desde la transdisciplinariedad

Sergio Andrés Ospino Ricardo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2023

Procesos de aprendizaje en el análisis de sostenibilidad en sistemas socio-ecológicos de cuenca: un enfoque desde la transdisciplinariedad

Sergio Andrés Ospino Ricardo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director:

Ph.D., Santiago Arango Aramburo

Co-directora:

Ph.D., Clara Inés Villegas Palacio

Línea de Investigación:

Sistemas socio-ecológicos

Grupo de Investigación:

Ciencias de la Decisión

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2023

Pues bien: cuando se me agoten las fuerzas,
desistiré.

– *Antígona*, Sófocles

Agradecimientos

Al Padre Eterno que habita en los Cielos, porque es por Su gran misericordia y amor que pude emprender este camino tan privilegiado y lleno de bendiciones. Toda la gloria a Él.

Pensaba dedicar sólo un par de párrafos a esta sección, pero recordé aquellas palabras de mi profesor de filosofía¹ cuando, luego de hojear un lamentable ensayo de mi autoría, me preguntó: “¿Por qué tan lacónico, Sergio?”. Así, me propongo a adoptar un tono más prosaico y a explayarme en agradecimientos, porque hay muchos a quienes agradecer.

En primer lugar, a mis padres, Hernán y Patricia, y a mi hermano David. Es difícil concebir un mundo sin ellos, pues sería un mundo sin amor ni calidez, un mundo baldío. Por esos días en los que no los pude acompañar por estar ocupado con la tesis, por esos momentos de mal genio que a veces no pude disimular, por siempre creer en mis capacidades y alentarme a ser una mejor persona. Por eso y muchísimo más, mi infinita gratitud. No sé que me depare el futuro, lo único que sé es que teniéndolos a ustedes a mi lado, cualquier viaje será placentero y la mayor bendición imaginable.

A mis directores de tesis, por la confianza que han depositado en mí. Al profesor Santiago doy gracias por sus enseñanzas sobre dinámica de sistemas y micromundos, pero, principalmente, agradezco su trato cálido, afable y alegre, y por tener siempre una palabra de aliento y motivación². A la profesora Clara agradezco sus palabras exhortativas cuando apenas estaba explorando la idea de hacer una maestría, brindándome su apoyo durante todo el proceso. Desde que la conozco he tenido el más alto concepto de ella, en especial por su compromiso con la verdad, la enseñanza y el rigor investigativo. A ambos, ¡mil y un millón de gracias por todo!

A mi querida amiga y compañera de maestría, Diana Mejía. Me sigue pareciendo increíble que personas como Diana habiten este mundo: tan llenas de bondad, paciencia, de buenas intenciones hacia su prójimo, tan sensatas y prudentes en su pensar y actuar. Gracias, Diana, por tener siempre la palabra indicada, el consejo preciso y la buena disposición para ayudarme. Por acompañarme a Belmira, por aconsejarme sobre la redacción de la tesis, por ayudarme a conseguir gente para poner a prueba el micromundo, por los tinticos que nos tomamos (y los que tenemos pendientes), por todo eso y mucho más, mis más sinceros agradecimientos. Siempre estaré en deuda contigo.

¹Un saludo al profe Checho, dondequiera que esté.

²También le agradezco mucho el haberme introducido al mundo del buen café.

A la investigadora y colega, Linda Berrío. Una mujer admirable en todo sentido, vivo ejemplo de la perseverancia, el trabajo duro y la dedicación. Por acompañarme en este proceso desde el primer día, por sus enseñanzas durante el curso de “Sistemas socio-ecológicos”, por tenerme tanta paciencia durante el proceso de adaptación y validación del modelo. ¡Muchísimas gracias!

A los miembros del Grupo de Ciencias de la Decisión: las profes Yris y Patricia, Juan, Jessica, Luisa, Antonio, Pipe, Mateo y Paulina. Les agradezco enormemente por haberme recibido con los brazos abiertos, por su trato afectuoso y sus valiosos aportes durante las pruebas alfa del micromundo. Me permito hacer una mención honorífica a Verónica Valencia, a quien admiro mucho desde que estábamos en el pregrado y quien fue la primera persona en sembrar en mi mente la idea de hacer una maestría. ¡Muchas gracias a todos/as!

A Lina Berrouet, profesora de la Universidad de Antioquia y directora del proyecto que cofinanció mis estudios, doy gracias por sus comentarios, sugerencias y compañía durante todo el proceso. También agradezco a su estudiante, Yésica Gómez, quien me apoyó con paciencia y generosidad durante la integración de su marco de sostenibilidad en el micromundo. Espero que nuestros caminos vuelvan a cruzarse.

A la Subsecretaría de Ambiente de La Ceja, con mención especial a Mauricio Ospina, líder de esa oficina, quien muy amablemente me sacó un espacio para presentarle el proyecto y, de la forma más desinteresada posible, me brindó una mano amiga cuando más la necesitaba. También agradezco enormemente a Daniela Cardona y Andrea Botero por ayudarme a concertar otros talleres y con varios aspectos logísticos. A todos/as ellos/as, ¡mil gracias! Literalmente, me salvaron la tesis.

A la Facultad de Minas agradezco por haberme apoyado económicamente mediante dos vías: (i) el proyecto “Micromundo para el aprendizaje de efectos de reglas de decisión en las dinámicas socioecológicas de una cuenca hidrográfica, cód. H:49936”, y (ii) el Beneficio de Exención de Derechos Académicos (BEDA) durante el último semestre. También agradezco a la Universidad Nacional de Colombia—sede Medellín, a la Universidad de Antioquia y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, por brindarme otra generosa fuente de financiación a través del proyecto “Sostenibilidad de sistemas socioecológicos en cuencas estratégicas en contextos de cambio ambiental, cód. MIN2020-37035”.

A la profesora Carolina Ortiz, por sus comentarios durante la redacción del proyecto de tesis; y a la profesora Aura Ruiz, por las asesorías sobre la dinámica de juego con el micromundo, por apoyarme con la logística de los talleres con el Consejo de Cuenca de Río Grande y con los actores de Belmira.

A Melissa Patiño, por su invaluable apoyo durante la contraprestación de horas del BEDA, por su grata compañía y por sus valiosos consejos. Siempre es bueno reencontrarse con personas que dejaron huella en uno.

A mis abuelos, por recibirme en su casa (mi segundo hogar) cuando tenía clases o jornadas largas en Medellín. También a todos mis familiares y amigos que me sirvieron de “conejiillos de indias” con el micromundo.

Al profesor emérito de la Universidad de Gante (Bélgica), el doctor Aimé Heene, cuya oportuna y amable ayuda fue fundamental para la construcción del indicador de aprendizaje.

A mis jurados de tesis, los profesores Luis Fernando Carvajal y John Dairo Zapata, por sus valiosos comentarios, sugerencias y correcciones.

Y, finalmente, a toda la comunidad cejeña, en especial a aquellos que, voluntariamente y con la mejor actitud, participaron en los talleres. Fue un gusto y un placer haberlos conocido. Seguiré esforzándome por contribuir al bienestar de los habitantes de este hermoso municipio al que puedo llamar *hogar*.

Resumen

Procesos de aprendizaje en el análisis de sostenibilidad en sistemas socio-ecológicos de cuenca: un enfoque desde la transdisciplinariedad

Desde hace algunos años, se viene haciendo un llamado al estudio transdisciplinar de los sistemas socio-ecológicos (SSE), en aras de aumentar su entendimiento y lograr su gestión sostenible. Un primer paso para avanzar hacia esa transdisciplinariedad es comprender la forma en que las personas dentro de un territorio (con distintos trasfondos, saberes y experiencias) aprenden y toman decisiones. Para mejorar dicha comprensión, esta tesis evaluó cómo ciertas características de los actores en un sistema socio-ecológico de cuenca afectan sus patrones de aprendizaje y su toma de decisiones. Para ello, se construyó una herramienta interactiva de aprendizaje (micromundo) y se utilizó en una serie de talleres con actores de la cuenca del Río Negro (Antioquia). Los resultados mostraron que (i) hubo un aumento significativo en el aprendizaje de los participantes luego de usar el micromundo, y (ii) hubo un efecto significativo de cinco características de los participantes sobre algunos componentes de aprendizaje. Así, se concluye que los micromundos son una herramienta efectiva para aprender acerca del efecto de distintas decisiones sobre la sostenibilidad de un SSE, pero también se plantea la necesidad de incluir los diferentes matices de los actores en el diseño de estrategias pedagógicas sobre sostenibilidad, con el fin de alcanzar los objetivos de aprendizaje y promover una toma de decisiones equitativa.

Palabras clave: sistemas socio-ecológicos, sostenibilidad, procesos de aprendizaje, micromundo, dinámica de sistemas, transdisciplinariedad.

Abstract

Learning processes in sustainability analysis of socio-ecological watershed systems: a transdisciplinarity approach

For several years now, there has been a call for the transdisciplinary study of socio-ecological systems (SES), to enhance their comprehension and achieve their sustainable management. A first step towards this transdisciplinarity is understanding how individuals within a territory (with different backgrounds, knowledge, and experiences) learn and make decisions. To enhance such understanding, this thesis assessed how certain characteristics of actors in a watershed socio-ecological system affect their learning patterns and decision-making processes. To this end, an interactive learning tool (microworld) was developed and used in a series of workshops with actors from the Río Negro basin (Antioquia). The results showed that (i) there was a significant increase in the participants' learning after using the microworld, and (ii) there was a significant effect of five characteristics on certain learning components. Thus, it is concluded that microworlds are an effective tool for learning about the impact of various decisions on the sustainability of an SES. However, it also raises the need to incorporate the different nuances of the actors in the design of pedagogical strategies on sustainability, with the aim of achieving learning objectives and promoting equitable decision-making.

Keywords: social-ecological systems, sustainability, learning processes, microworld, system dynamics, transdisciplinarity

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	XI
Lista de figuras	XVI
Lista de tablas	XVII
Lista de símbolos	XVIII
1. Introducción	1
2. Marco teórico	4
2.1. Sistemas socio-ecológicos: retos y oportunidades	4
2.2. Aprendizaje social de sistemas socio-ecológicos	7
3. Metodología de investigación	11
3.1. Construyendo un micromundo de un SSEC	11
3.1.1. Objetivo de aprendizaje y público objetivo	12
3.1.2. Construcción del modelo	13
3.1.3. Construcción del entorno virtual	15
3.1.4. Pruebas piloto	16
3.2. Evaluación del aprendizaje con micromundos	16
3.2.1. Conceptualización	16
3.2.2. Medición y análisis	17
3.2.3. Características de los actores	19
3.3. Puesta en funcionamiento	21
4. ORBEM: un micromundo para la sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos de cuenca	23
4.1. Objetivo de aprendizaje y público objetivo	23
4.2. Construyendo el modelo	24
4.2.1. Conceptualización	24
4.2.2. Formulación matemática	26
4.2.3. Validación	33

4.3. Construyendo el entorno virtual	36
4.3.1. Interfaz gráfica	38
4.3.2. Material de apoyo	41
4.3.3. Iteración	41
4.3.4. Pruebas piloto	43
5. Aprendiendo sobre sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos con ORBEM	45
5.1. Medición del aprendizaje	46
5.2. Caracterización de los actores	48
5.3. Efecto de las características de los actores sobre su aprendizaje	52
5.3.1. Conocimiento subjetivo	52
5.3.2. Actitud hacia las decisiones	55
5.3.3. Intención de comportamiento	56
5.4. Preguntas abiertas	59
5.5. Observaciones finales	61
6. Conclusiones	63
6.1. Limitaciones del estudio y recomendaciones	64
6.2. Trabajo futuro	67
A. Anexo: Variables del modelo	69
B. Anexo: Pruebas de condiciones extremas	73
C. Anexo: Brochure con las instrucciones del juego	75
D. Anexo: Resultados de los análisis de varianza (ANOVA)	77
E. Anexo: Indicadores de aprendizaje	82
F. Anexo: Registro fotográfico de los talleres con el micromundo	90
Bibliografía	93

Lista de figuras

4-1. Diagrama causal del SSEC modelado.	25
4-2. Resultados del análisis de sensibilidad para las tres variables de cobertura.	35
4-3. Página de inicio del micromundo ORBEM.	39
4-4. Primera ventana de resultados del micromundo.	39
4-5. Primera ventana de decisiones del micromundo.	40
4-6. Primera versión de la interfaz del micromundo.	42
4-7. Registro fotográfico de la primera prueba alfa del micromundo.	43
5-1. Comparación de los puntajes por componente de aprendizaje, antes y después de usar el micromundo (media, desviación estándar).	47
5-2. Estadística descriptiva de las características demográficas.	49
5-3. Estadística descriptiva de las características de educación y formación.	49
5-4. Estadística descriptiva de las características de contexto socioeconómico.	50
5-5. Estadística descriptiva de las características de ubicación geográfica.	51
5-6. Estadística descriptiva de las características de preferencias personales.	51
5-7. Conocimiento subjetivo según género del participante y momento del taller (media, error estándar).	53
5-8. Conocimiento subjetivo según formación previa en temas ambientales y momento del taller (media, error estándar).	54
5-9. Conocimiento subjetivo según pertenencia a organizaciones ambientales y momento del taller (media, error estándar).	55
5-10. Actitud hacia las decisiones según estructura familiar y momento del taller (media, error estándar).	56
5-11. Intención de comportamiento según ocupación y momento del taller.	57
5-12. Intención de comportamiento según pertenencia a organizaciones ambientales y momento del taller (media, error estándar).	58
B-1. Valor inicial de bosques al 100 %	73
B-2. Valor inicial de pastos al 100 %	74
B-3. Valor inicial de cultivos al 100 %	74
F-1. Subsecretaría de Ambiente, 6/junio/2023	90
F-2. Comunidad y representante de Empresas Públicas de La Ceja, 23/junio/2023	91

F-3. Autoridad ambiental y academia (programa Piragua de Corantioquia–UdeA, virtual), 27/junio/2023	91
F-4. Comité Interinstitucional de Educación Ambiental (actores varios), 29/junio/2023	92

Lista de tablas

3-1. Características de los actores.	19
3-1. Características de los actores.	20
3-1. Características de los actores.	21
4-1. Prueba de condiciones extremas.	34
4-2. Comparación entre datos de coberturas simulados vs históricos.	36
5-1. Talleres realizados con la muestra del público objetivo.	45
5-2. Protocolo de las sesiones con el micromundo.	46
5-3. Resultados de la prueba Shapiro-Wilk.	47
5-4. Compilado de las características y su incidencia sobre el aprendizaje.	61
D-1. Resultados para conocimiento subjetivo	77
D-1. Resultados para conocimiento subjetivo	78
D-2. Resultados para actitud hacia las decisiones	78
D-2. Resultados para actitud hacia las decisiones	79
D-2. Resultados para actitud hacia las decisiones	80
D-3. Resultados para intención de comportamiento	80
D-3. Resultados para intención de comportamiento	81

Lista de símbolos

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MM	Micromundo
POMCA	Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica
PSR	Percepción social del riesgo
SE	Servicio ecosistémico
SMMLV	Salario mínimo mensual legal vigente
SSE	Sistema socio-ecológico
SSEC	Sistema socio-ecológico de cuenca
PSA	Pago por Servicios Ambientales

1. Introducción

El enfoque de sistemas socio-ecológicos (SSE) marcó un cambio de paradigma importante frente a la forma en que se abordaban los retos ambientales más acuciantes en todo el mundo. Dicho enfoque ayudó a derribar la falsa premisa de que lo natural y lo social constituían cada uno sistemas independientes (Biggs et al., 2021, p. 5), cuando en realidad ambos sistemas están fuertemente entrelazados y sus elementos interactúan entre sí a lo largo de distintas escalas espaciotemporales, describiendo ciclos de realimentación que dan lugar a comportamientos muchas veces inesperados (Biggs et al., 2021, p. 5).

Un ejemplo muy claro de SSE son las cuencas hidrográficas, ya que son unidades territoriales integradas por diferentes elementos biofísicos (agua, suelo, flora, fauna) con elementos sociales, económicos y políticos (Cabello et al., 2015; Grigg, 2016), y son “unidades ampliamente aceptadas para la gestión de los recursos naturales” (Carpenter et al., 2015). Colombia cuenta con instrumentos de planificación y gestión de cuencas llamados Planes de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA), y en su elaboración participa la sociedad civil, autoridades ambientales, gremios económicos, representantes de gobiernos locales, entre otros (Decreto 1076, 2015, art. 2.2.3.1.5.1). Por este motivo, resulta conveniente hablar de sistemas socio-ecológicos de cuenca (SSEC).

Ahora bien, en la medida en que la subsistencia y el progreso de las civilizaciones depende de la integridad de los bienes y servicios brindados por la naturaleza (Díaz et al., 2015; MEA, 2005), se ha venido planteando desde hace varios años la necesidad de conceptualizar y operacionalizar de forma rigurosa la sostenibilidad de los sistemas socio-ecológicos, ya que esta se ve afectada por múltiples factores antrópicos y naturales, internos y externos al sistema (Gómez-Jaramillo, 2023). Particularmente, los factores antrópicos e internos son muy importantes ya que son, en gran medida, producto de la toma de decisiones por parte de los actores en un SSE, bien sea a través de políticas públicas, nuevas formas de producción, cambios en el uso de suelo, etc.

Esas decisiones a menudo son tomadas por muchos actores de forma simultánea, cada uno desde sus intereses y con base en la información que tenga disponible en el momento. A simple vista, es difícil discernir las consecuencias que cada una de esas decisiones tendrá sobre el SSE en el largo plazo, razón por la cual una forma muy útil de representar los factores de cambio y sus interacciones es mediante la modelación dinámica, ya que permite simular

y visualizar cambios en los componentes del sistema y su efecto sobre otros componentes a lo largo del tiempo (Schlüter et al., 2019). Sin embargo, los resultados de muchos modelos de sistemas complejos son poco usados por los tomadores de decisiones y diseñadores de políticas, lo cual conduce a que la toma de decisiones esté guiada por la intuición y no por un entendimiento genuino del sistema (Sterman et al., 2013). En vista de este problema, se ha resaltado la necesidad de construir herramientas enfocadas en potenciar la comprensión de sistemas complejos, que complementen los métodos tradicionales de enseñanza y que, a través de una experimentación directa y controlada, se logre ese aprendizaje (Sterman, 2014), el cual redundaría en una mayor capacidad para tomar decisiones en los sistemas reales.

Una de esas herramientas para potenciar la comprensión de sistemas complejos son los micromundos, originalmente propuestos por el científico Seymour Papert en 1980 y definidos como “entornos computacionales donde los estudiantes se vuelven arquitectos y constructores activos de su propio aprendizaje” (Papert, 1980, p. 122). En la actualidad, también se los conoce como “simuladores de vuelo para la administración” (en inglés, *management flight simulators*), ya que se los compara con el entrenamiento que reciben los pilotos de avión durante su formación en cabinas que recrean de manera realista las condiciones de vuelo y permiten a los pilotos practicar y entrenar en un entorno seguro y controlado antes de enfrentarse a situaciones reales en un avión (Kim, 2018).

Así, la finalidad última de todo micromundo es que cualquier persona inmersa dentro de un sistema complejo adquiera una visión más clara del mismo y que, con ello, tome mejores decisiones en el mundo real. Pero surge, entonces, la pregunta: ¿basta con que cualquier persona use este tipo de herramientas para que obtenga un aprendizaje? En el contexto de SSE esto es todavía más relevante, ya que, a diferencia de los simuladores de vuelo mencionados arriba, los SSE no incluyen uno o dos actores, sino cientos, miles y hasta millones, cada uno con experiencias, necesidades, actitudes y características distintas.

Ante esta diversidad de actores, algunos investigadores vienen advirtiendo desde hace tiempo la necesidad de abordar el estudio de SSE desde un enfoque transdisciplinario, es decir, desde un enfoque en el cual se dé una coproducción del conocimiento entre todos los actores, tanto académicos como no académicos (Angelstam et al., 2013; Holzer et al., 2019). Y en aras de transitar hacia esa transdisciplinariedad, resultará de gran importancia analizar cómo las características de dichos actores determinan su proceso de aprendizaje y, por ende, su toma de decisiones; decisiones que, a su vez, serán las que guíen las estrategias para alcanzar la sostenibilidad del sistema. Esto adquiere aún más relevancia en sistemas socio-ecológicos de cuenca, ya que, como se indicó anteriormente, las cuencas hidrográficas constituyen un elemento fundamental a la hora de planificar y ordenar los territorios, participando en el proceso una multiplicidad de actores. Por lo tanto, la pregunta de investigación que pretende responder esta tesis es la siguiente:

¿Cómo influyen las características de los diferentes actores de un sistema socio-ecológico de cuenca en su proceso de aprendizaje y sobre la toma de decisiones?

Para abordar esta pregunta, se definen los siguientes objetivos:

- Objetivo general: evaluar la incidencia que distintas características de los actores de un sistema socio-ecológico de cuenca tienen sobre el proceso de aprendizaje y sobre la toma de decisiones, a través de un micromundo.
- Objetivos específicos:
 1. Desarrollar un micromundo a partir de un modelo dinámico previamente elaborado de un sistema socio-ecológico de cuenca en Colombia.
 2. Comparar el aprendizaje del público objetivo que se logra alcanzar antes y después de la utilización del programa de aprendizaje que incluye el uso del micromundo.
 3. Realizar un análisis sobre la relación entre las características de los actores y el aprendizaje alcanzado.

La investigación busca ser un referente en varios aspectos dentro del ámbito de los sistemas socio-ecológicos:

- apropiación social del conocimiento, un aspecto crítico en la ciencia moderna y un pilar del acceso abierto al conocimiento. El micromundo es de uso libre, y desde su concepción se buscó que fuese accesible para una amplia gama de audiencias. Esto significa que cualquier persona, independientemente de su formación o conocimientos previos, puede interactuar con la herramienta y aprovechar los conocimientos que ofrece. Este enfoque no solo democratiza la ciencia, sino que también facilita una mayor comprensión y reconocimiento de la importancia de los sistemas socio-ecológicos;
- desarrollo de una metodología para la construcción de micromundos de sistemas socio-ecológicos, un campo poco explorado en la literatura científica. Se espera que este trabajo sirva como un recurso valioso para los investigadores que, en el futuro, deseen construir sus propias herramientas de aprendizaje de SSE;
- uso de un enfoque de sostenibilidad fuerte (es decir, un enfoque que reconoce la importancia de la naturaleza como el sustento de toda la vida), combinado con técnicas de modelación dinámica que abordan las principales características de los sistemas complejos: ciclos de realimentación, retardos o retrasos, no linealidades, etc. Al hacerlo, la investigación contribuye a una comprensión más precisa y efectiva de cómo mejorar la sostenibilidad en estos sistemas.

2. Marco teórico

En este capítulo se presenta el sustento teórico que guiará toda la investigación, dividido en dos partes: en la primera se habla sobre el enfoque de sistemas socio-ecológicos, sus principales características, retos y oportunidades; en la segunda parte se habla sobre aprendizaje de SSE, en particular sobre los micromundos como aproximaciones metodológicas para potenciar la comprensión de estos sistemas, y los desafíos respecto a la transdisciplinariedad.

2.1. Sistemas socio-ecológicos: retos y oportunidades

Los sistemas socio-ecológicos representan un enfoque conceptual integrador que busca comprender las interacciones dinámicas y recíprocas entre las sociedades humanas y sus ambientes naturales (Biggs et al., 2021). Esta perspectiva reconoce que los humanos, lejos de ser observadores pasivos, son parte integral y activa de los ecosistemas en los que se encuentran inmersos.

El término “sistema socio-ecológico” fue popularizado por el trabajo pionero de Berkes y Folke, *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*, publicado en 1998 (Biggs et al., 2021, p. 5), y desde entonces se ha caracterizado por adoptar una visión holística de la realidad, es decir, por analizar los fenómenos como un todo, donde el comportamiento observado del sistema es mucho más que la suma de los comportamientos individuales de sus componentes (Petrosillo et al., 2015).

En un SSE, los componentes sociales incluyen factores como las instituciones, las normas culturales, los patrones económicos y las estructuras políticas, mientras que los componentes ecológicos abarcan las características biofísicas y los procesos ecológicos, y la interacción entre ambos componentes dan lugar a una serie de procesos de co-evolución que pueden ser tanto armoniosos como conflictivos (Colding & Barthel, 2019; Ostrom, 2009). Así, los principios y características clave que definen y diferencian a los SSE son los siguientes:

- **Interdependencia y retroalimentación:** las interacciones entre los componentes sociales y ecológicos no son unidireccionales, sino que implican ciclos de retroalimentación, donde las acciones humanas afectan a la ecología y, a su vez, los cambios en el ecosistema influyen en las acciones y decisiones humanas (Martínez-Fernández et al., 2021).

- **No linealidad:** los ciclos de realimentación entre los componentes hacen que las respuestas del sistema a las perturbaciones o cambios no siempre sean proporcionales a la magnitud de la perturbación inicial, es decir, pequeñas modificaciones pueden generar grandes cambios, y viceversa (Levin et al., 2013).
- **Heterogeneidad:** los SSE son inherentemente heterogéneos en términos de sus componentes y estructuras, tanto en el ámbito social como ecológico. Esta heterogeneidad se refleja en la diversidad de actores, instituciones, especies, hábitats y procesos ecológicos presentes en el sistema (Ostrom, 2009).
- **Incertidumbre y cambio:** la naturaleza dinámica y compleja de los SSE hace que estos estén en constante evolución y sujetos a un alto grado de incertidumbre. Dicha incertidumbre puede ser resultado de la variabilidad natural, el cambio climático, las acciones humanas, o la limitada capacidad para predecir el comportamiento del sistema (Biggs et al., 2021; Levin et al., 2013).
- **Adaptabilidad y resiliencia:** se refiere a la capacidad de un SSE para adaptarse a cambios y perturbaciones, manteniendo su funcionalidad y estructura esencial. Los sistemas resilientes son capaces de aprender, auto-organizarse y transformarse en respuesta a los cambios (Folke et al., 2016).

Ahora bien, como resultado de estas características, la gestión de los sistemas socio-ecológicos se enfrenta a una serie de problemáticas y desafíos únicos:

1. Debido a las numerosas interacciones no lineales y retroalimentaciones, la predicción de la evolución de estos sistemas y su respuesta a diferentes intervenciones o perturbaciones se convierte en una tarea enormemente desafiante, lo cual puede obstaculizar el proceso de toma de decisiones y la planificación a largo plazo (Sterk et al., 2017).
2. La diversidad de actores presentes en los SSE, con intereses, valores y objetivos diferentes, puede dar lugar a conflictos y tensiones. La gestión de estos sistemas debe, por tanto, encontrar formas de mediar estos conflictos y garantizar que las decisiones y acciones tomadas sean equitativas y justas para todos los actores involucrados (Koontz et al., 2015).
3. Los SSE pueden experimentar cambios abruptos cuando se sobrepasan ciertos umbrales ecológicos. Al cruzar uno de estos umbrales, el sistema puede transitar a un estado ecológico alternativo, con características y funcionalidades diferentes, trayendo consigo cambios que pueden ser difíciles o incluso imposibles de revertir (Cumming & Peterson, 2017).
4. La gestión de los SSE se dificulta aún más por la existencia de múltiples escalas temporales y espaciales en las que estos sistemas operan. Las intervenciones que pueden

ser beneficiosas a una escala pueden tener efectos negativos en otra. Además, los efectos de las decisiones y acciones pueden no manifestarse hasta mucho tiempo después, complicando la planificación y la asignación de responsabilidades (Martínez-Fernández et al., 2021).

Todos estos retos sobre la gestión de SSE se traducen en una gran dificultad para garantizar su sostenibilidad, definida como “aquella condición del SSE que considera el cumplimiento de un estándar social mínimo en términos de bienestar (base social), sin exceder los límites ecológicos para mantener o potenciar el funcionamiento ecológico (y el bienestar social), frente a diferentes impulsores de cambio exógenos y endógenos” (Gómez-Jaramillo, 2023). Estos “impulsores de cambio” (también llamados “vectores de cambio” o *drivers*, en inglés) son fuerzas de origen natural o antrópico, directas o indirectas, que alteran y modifican los SSE (MEA, 2005), y se los puede categorizar según si son endógenos o exógenos: los primeros son aquellos que “emergen de las relaciones de realimentación interna dentro de los límites de un sistema” (Nguyen et al., 2017), mientras que los exógenos “surgen por fuera de los límites del sistema pero influyen sobre los impulsores endógenos” (Nguyen et al., 2017).

Una forma de simular y visualizar los cambios provocados por estos impulsores, así como su efecto sobre el sistema a lo largo del tiempo, es a través de la modelación dinámica (Schlüter et al., 2019), para lo cual existen diferentes enfoques, por ejemplo: redes bayesianas, las cuales utilizan “relaciones probabilísticas para describir las conexiones entre las variables del sistema” (Kelly et al., 2013); modelos basados en agentes, en los cuales se definen entidades (o agentes) que, mediante sus atributos e interacciones, determinan el comportamiento del sistema (Schlüter et al., 2019); modelos bioeconómicos, que “aplican la teoría económica a casos particulares para determinar estrategias de gestión óptimas” (Schlüter et al., 2019); dinámica de sistemas, cuya base es la “causalidad, realimentación entre variables y la consideración explícita de retardos y no linealidades” (Berrio-Giraldo, 2020); entre otras. Cada uno de ellos tiene sus particularidades, pero todos sirven para representar de forma simplificada los SSE, y su selección va a depender estrictamente del propósito de cada modelo (predicción, pronóstico, aprendizaje, etc.) y de los objetivos que se quieran lograr.

No obstante, como se mencionó en la introducción, aun cuando dichas técnicas de modelación son muy útiles para el análisis de sistemas complejos, muchas veces se convierten en “modelos de caja negra” (Abram, 2018), en los cuales es difícil conocer a plenitud lo que realmente está sucediendo dentro del sistema, “trasladando la complejidad inherente del mundo a los modelos usados para representarlo” (Abram, 2018). Así, pues, en la siguiente sección se profundizará en las herramientas que se han desarrollado para dar una mayor accesibilidad a los modelos y obtener un mayor aprendizaje de estos sistemas complejos.

2.2. Aprendizaje social de sistemas socio-ecológicos

La necesidad de modelos de SSE va mucho más allá de brindar a los diseñadores de políticas una forma de hacer mejor su trabajo. Desde hace algunos años se viene diciendo que “resolver los problemas de sostenibilidad involucra decisiones que requieren de la participación ciudadana y de la construcción de legitimidad social para caminos de transición hacia sociedades sostenibles” (Popa et al., 2015). En ese contexto, se reconoce cada vez más “la necesidad de moverse de enfoques interdisciplinarios a colaboraciones transdisciplinarias, que unan la experticia científica con la experiencia extra-científica” (Popa et al., 2015). En particular, se busca un enfoque en el que se den “procesos colectivos de definición y resolución de problemas mediante el aprendizaje social y la experimentación conjunta” (Popa et al., 2015).

Justamente, uno de los propósitos que todo modelador de SSE debe evaluar a la hora de usar un enfoque de modelación u otro es el de “mejorar el entendimiento del sistema y el aprendizaje social” (Kelly et al., 2013). Los enfoques de dinámica de sistemas y modelación basada en agentes suelen ser los más adecuados para este propósito, ya que permiten “a los tomadores de decisiones y partes interesadas experimentar con el modelo y probar distintos supuestos sobre procesos poco entendidos” (Kelly et al., 2013). Sin embargo, como se mencionó al final del capítulo anterior, los modelos de sistemas complejos presentan importantes dificultades de accesibilidad, razón por la cual han surgido distintas propuestas de herramientas interactivas para facilitar a audiencias más amplias la posibilidad de aprender sobre los procesos dentro de un SSE y sobre las posibles vías para lograr una gestión sostenible.

Es aquí donde los micromundos se presentan como una alternativa poderosa para soslayar estas dificultades. Como se mencionó en la Introducción, la mayor fortaleza de los micromundos es que permiten un aprendizaje de sistemas complejos basado en la experimentación, ya que los usuarios pueden ver de forma directa e inmediata las consecuencias de sus decisiones y así aprender de ellas (MIT Sloan, 2022). Además, permiten a personas poco experimentadas el acceso a modelos de simulación complejos, ya que es tan simple como implementar acciones en una interfaz virtual y observar sus efectos en un horizonte de tiempo determinado con ayuda de gráficos, hojas de cálculo, animaciones, etc. (Kim, 2018; Ventana Systems Inc., 2015).

En experimentos con micromundos “se pide a los sujetos (o grupos de sujetos) interactuar con una simulación computacional de algún sistema por un período de tiempo, para llevarlo a un estado más o menos bien definido y mantenerlo así por algún tiempo” (Brehmer, 2005, p. 4). Mientras el usuario “juega” a ser un tomador de decisiones en el micromundo, pone a prueba sus modelos mentales sobre la estructura del sistema, las reglas y dinámicas que lo rigen, y de esta manera “el estudiante practica nuevas estrategias y políticas, reflexiona sobre los resultados, y debate temas con colegas y tutores” (Warren & Langley, 1999).

Según Chen & Bell (2016), todo micromundo debe cumplir con tres características esenciales: complejidad, es decir, los participantes deben considerar múltiples objetivos que, en la práctica, pueden ser contradictorios y generar *trade-offs*; dinamismo, esto es, que las decisiones estén conectadas entre sí, se tomen en tiempo real y el micromundo reaccione tanto a esas decisiones como a factores endógenos del modelo; y opacidad, ya que los participantes deben explorar y experimentar para descubrir la estructura oculta del sistema (Brehmer, 2005; Chen & Bell, 2016).

En sus primeros días, la mayoría de micromundos estaban enfocados en temas de cadenas de suministros (Sterman, 1989), administración de empresas y competencia de mercados (Graham et al., 1992), pero en años recientes se han aplicado también para una amplia variedad de temas: difusión de energías renovables (Marrero-Trujillo, 2020), cursos introductorios de programación (Papadopoulos & Tegos, 2012), mercados energéticos (Franco et al., 2012), entre otros. A continuación, se muestran algunos casos notables de micromundos enfocados en gestión de recursos naturales, cambio climático y cuencas hidrográficas.

- **Banco de Peces:** este micromundo busca recrear la célebre Tragedia de los Comunes de Garret Hardin, y para ello ubica a los jugadores como gerentes de pesquerías cuyo principal objetivo es maximizar ganancias (Sterman, 2014). No obstante, al hacerlo deben ser muy cuidadosos de no agotar su principal recurso renovable: los peces. Los resultados de este micromundo han demostrado la dificultad que tienen las personas para entender “las dinámicas de la acumulación de recursos y los procesos de realimentación que controlan la extracción y la regeneración” (Sterman, 2014), razón por la cual el juego constituye una herramienta muy útil tanto para productores como para diseñadores de políticas en relación con la gestión adecuada de los recursos naturales.
- **World Climate:** consiste en un juego de roles en el cual los participantes son delegados de diferentes países, a quienes se convoca a una cumbre ficticia de las Naciones Unidas para definir las políticas que mitigarán el calentamiento global, cada uno en función de los intereses propios de la nación que representa (Sterman, 2014; Sterman et al., 2013). El juego está mediado por un simulador llamado C-ROADS, en el cual se ingresan las decisiones y se observan de forma inmediata los efectos sobre emisiones de gases de efecto invernadero, temperatura superficial, aumento del nivel del mar, entre otros (Sterman, 2014). La experiencia permite a los participantes tomar decisiones en un entorno controlado, y vivir en carne propia la dificultad de llegar a acuerdos para resolver un problema tan complejo como lo es el cambio climático.
- **Climate Action:** al igual que *World Climate*, es un juego de roles en el cual los participantes deben evitar que la temperatura global aumente 2°C por encima de niveles preindustriales (Climate Interactive, 2023). En este caso, el simulador usado no

es C-ROADS sino una versión expandida del mismo, llamado EN-ROADS. El simulador incluye un amplio abanico de decisiones, categorizadas en: fuentes de energía, transporte, construcción e industria, crecimiento socioeconómico, usos de suelo y remoción de carbono (Climate Interactive, 2023). Según sus desarrolladores, el juego ha sido usado por más de 300.000 personas en 85 países, en espacios que van desde oficinas gubernamentales hasta salones de clase y juntas corporativas (Climate Interactive, 2023).

- **SimBasin:** desarrollado por Craven et al. (2017), el juego busca promover el aprendizaje social en la cuenca del Magdalena-Cauca en Colombia, una región afectada por el estrés hídrico y la degradación ambiental. El juego se puso a prueba con tomadores de decisiones de alto nivel en una sesión en la cual se les dividía en grupos, cada uno representando sectores distintos, y debían ponerse de acuerdo para decidir qué proyectos implementarían en el transcurso de 30 años con el fin de mantener una serie de indicadores dentro de rangos aceptables. El juego brindó un espacio libre de restricciones donde los interesados y científicos pudieron encontrarse y comparar de manera crítica sus modelos mentales con un modelo computacional, obteniendo ideas interesantes de ambos lados para atender a los problemas críticos de seguridad hídrica en las cuencas (Craven et al., 2017).

Si bien estos micromundos representan un hito en el acercamiento de sistemas naturales complejos a audiencias más amplias, no se encuentra registro de estas herramientas en las que se haga explícito el enfoque teórico de SSE (i.e., donde consideren explícitamente las interacciones, realimentaciones, interdependencias e impulsores de cambio entre las dimensiones humana y natural), ni tampoco se centran en analizar la sostenibilidad del sistema (o lo hacen de forma tácita, sin especificar el marco conceptual utilizado). Más aún, muy pocos autores evalúan si los micromundos realmente generan un aprendizaje en sus usuarios (Grössler, 2001; Miller et al., 1999; Hendrik Stouten et al., 2017), ni tampoco se preocupan por la incidencia de las características individuales de los jugadores en su proceso de aprendizaje. Todo esto debería ser parte importante del análisis, teniendo en cuenta el llamado de los investigadores de SSE hacia la transdisciplinariedad, donde la coproducción del conocimiento involucra a actores con trasfondos, saberes y experiencias diferentes. Finalmente, vale la pena resaltar dos instituciones que fueron pioneras y, hoy en día, continúan a la vanguardia en el desarrollo de micromundos: la Universidad Harvard y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). En sus sitios web se encuentra un catálogo diverso de simuladores, muchos de ellos accesibles de forma gratuita y con amplios recursos para facilitar su uso (documentación, tutoriales, videos, etc.)¹. El respaldo de instituciones tan prestigiosas pone de manifiesto el estatus de los micromundos como una corriente investigativa en auge. La

¹Para más información, consultar los siguientes enlaces: <https://hbsp.harvard.edu/simulations/> y <https://mitsloan.mit.edu/teaching-resources-library/management-simulations>

exploración continua de estas herramientas y sus aplicaciones, por tanto, se posiciona como un tema con mucho potencial en la esfera académica.

3. Metodología de investigación

En este capítulo se describe la metodología propuesta para dar cumplimiento a los objetivos de la tesis. La Sección 3.1 trata sobre el proceso de construcción del micromundo¹. En la Sección 3.2 se explica cómo se evaluó la capacidad del micromundo para generar aprendizaje sobre sus usuarios. Finalmente, en la Sección 3.3 se describe el proceso de evaluación de las características de los usuarios sobre su proceso de aprendizaje.

3.1. Construyendo un micromundo de un SSEC

Uno de los esfuerzos metodológicos recientes más importantes para el diseño de micromundos fue llevado a cabo por Marrero-Trujillo (2020), quien definió una metodología iterativa y simultánea. Iterativa porque, a medida que se ejecuta, surgen nuevos hallazgos que hacen necesario revisar y replantear los pasos previos; simultánea porque implica el desarrollo de un modelo matemático a la par de un entorno virtual². Dados los objetivos de la presente tesis, se escogió dicha propuesta metodológica para el desarrollo del micromundo, realizando algunas modificaciones según conveniencia.

El primer paso consistió en definir (i) el *objetivo de aprendizaje*, es decir, lo que se espera que aprendan las personas mediante el uso de la herramienta, y (ii) el *público objetivo*, es decir, el tipo de población a quien va dirigida y de quienes se espera que alcancen un aprendizaje.

El segundo paso fue construir un modelo matemático que sirviera de base para todo el micromundo. Para esta investigación, se seleccionó y adaptó un modelo de dinámica de sistemas previamente desarrollado por Berrio-Giraldo (2020), en el cual se representaron los cambios de coberturas y usos de suelo en un sistema socio-ecológico de cuenca, sus interacciones con los servicios ecosistémicos y con las dimensiones social y económica (Berrio-Giraldo, 2020).

¹Al momento de redactar la tesis, esta sección se encuentra en proceso de publicación como capítulo de un libro titulado *Marcos metodológicos para la investigación interdisciplinaria actual enfocada al manejo de sistemas socioecológicos*, cuya edición está a cargo de El Colegio de Michoacán (México). Adicionalmente, hay un artículo científico en proceso de redacción.

²No todos los micromundos deben ser simulaciones computacionales, también hay micromundos que son juegos de mesa, modelos físicos o juegos de roles. Sin embargo, “en sistemas con alta complejidad dinámica, la simulación computacional, por lo general, es necesaria” (Sterman, 2000, p. 60). Dado que los sistemas socio-ecológicos son de alta complejidad, se decidió hacer el micromundo de esta manera.

En el tercer paso se construyó el entorno virtual del micromundo, entendido como el conjunto de elementos con los cuales interactúa el usuario final y que debe integrarse al modelo. Incluyó tanto el diseño de la interfaz gráfica como la elaboración del material de apoyo que indica al usuario cómo usar la herramienta de forma autónoma, o al instructor, en caso de que fuese una sesión guiada (Marrero-Trujillo, 2020).

El cuarto y último paso consistió en realizar pruebas piloto, primero con un público experto en los temas que aborda el micromundo (pruebas alfa), y luego con un grupo de personas no experto con características similares al público objetivo (pruebas beta) (Marrero-Trujillo, 2020).

A continuación, se describe a detalle cada uno de estos pasos.

3.1.1. Objetivo de aprendizaje y público objetivo

Es el paso más sencillo de todos y, a la vez, el más importante. En esta etapa de la metodología se definió, en primer lugar, de forma clara y explícita cuál es el conjunto de conocimientos que se espera que adquieran los usuarios del micromundo. Si bien este es una herramienta que potencia la comprensión de sistemas complejos, hay que acotar muy bien las partes exactas de dichos sistemas que se quieren abordar y por qué. Esto facilitará más adelante la definición de decisiones y resultados en la interfaz, toda vez que se visualizarán sólo aquellas variables relevantes para el aprendizaje y, por ende, no se saturará la experiencia del usuario. Según Grössler (2001), no siempre es necesario dejar explícito al usuario cuál es el objetivo de aprendizaje, pero “si los diseñadores o facilitadores del micromundo no saben cuáles son los objetivos de aprendizaje, difícilmente puede esperarse que los usuarios aprendan algo” (Grössler, 2001).

En segundo lugar, se debe especificar el público a quien irá dirigido la herramienta, es decir, el grupo de personas que se espera usen el micromundo y obtengan un aprendizaje de él. Como el propósito de dicho aprendizaje es conducir a una toma de decisiones mejor informada, es menester definir un público que tenga un rol activo en el sistema socio-ecológico seleccionado. Una forma de hacerlo es crear un listado o mapa de actores en el cual se visualicen los principales tomadores de decisiones³. Por otro lado, hay que considerar el hecho de que no todos estos actores necesariamente tendrán una formación tal que les permita acceder y comprender con facilidad la herramienta, razón por la cual, o bien se limita el público objetivo, o bien se plantea el micromundo en términos lo suficientemente sencillos como para ser usado por una audiencia mucho más amplia. Dado el enfoque de esta tesis, optamos por

³En este caso, se entiende por tomadores de decisiones a aquellos actores institucionales y no institucionales que viven y/o desarrollan sus actividades cotidianas dentro de la cuenca. Al hacerlo, interactúan entre sí y con otros componentes del sistema, lo cual modifica, en el corto o largo plazo, la estructura del SSE.

la segunda opción.

3.1.2. Construcción del modelo

Un micromundo es una forma accesible y didáctica de comprender sistemas complejos. Esto, sin embargo, sólo es posible mediante su integración con un modelo matemático subyacente (Graham et al., 1992; Senge, 1994; Sterman, 2000; Warren & Langley, 1999). Existen diferentes técnicas o enfoques para modelar sistemas socio-ecológicos (Berrio-Giraldo, 2020; Kelly et al., 2013), de los cuales vale la pena destacar dinámica de sistemas, debido a que permite analizar las relaciones causales entre las principales variables de un sistema, así como los diferentes ciclos de realimentación entre ellas, retardos en el tiempo y comportamientos no lineales, todo lo cual es característico de los sistemas socio-ecológicos (Martínez-Fernández et al., 2021). Además, es un enfoque de modelación adecuado para propósitos de aprendizaje social, entendimiento del sistema y toma de decisiones (Berrio-Giraldo, 2020; Kelly et al., 2013; Schlüter et al., 2019).

Para la presente investigación se seleccionó y adaptó un modelo de dinámica de sistemas previamente desarrollado. El modelo en cuestión busca representar los cambios de coberturas y usos de suelo del SSEC, y su incidencia sobre los principales servicios ecosistémicos (Berrio-Giraldo, 2020), tomando como caso de estudio la cuenca del Río Grande y Chico, ubicada al norte del departamento de Antioquia. La cuenca tiene un carácter estratégico para la región, ya que provee agua y energía a buena parte de la población, tiene una importante participación en el sector agropecuario e incluye ecosistemas estratégicos (Berrio-Giraldo, 2020). Por estos motivos, se consideró un modelo adecuado para analizar los procesos de toma de decisiones que afectan su sostenibilidad.

Así, el primer paso consistió en redefinir el propósito del modelo original, ya que este buscaba generar una visión detallada de los procesos de transición de coberturas y usos de suelo y las trayectorias de los servicios ecosistémicos en función de diferentes políticas (Berrio-Giraldo, 2020). Por otro lado, el micromundo estaba más enfocado en ayudar al usuario a aprender sobre sistemas socio-ecológicos de cuenca y los efectos de decisiones sobre su sostenibilidad.

En el segundo paso se hizo una conceptualización del modelo, la cual permitió tener una primera representación gráfica de la estructura del sistema socio-ecológico seleccionado (Berrio-Giraldo, 2020). En dinámica de sistemas, se suelen usar para este paso los diagramas causales, ya que permiten visualizar de forma explícita y sencilla las variables seleccionadas, sus relaciones de causalidad, los retardos entre ellas y los ciclos de realimentación (Elsawah et al., 2017). Como consecuencia de la redefinición del propósito del modelo en el paso anterior, fue necesario hacer un proceso de simplificación, en aras de brindar una experiencia más general que, sin embargo, conservase los elementos clave del sistema, a saber, no linealidad,

retardos, comportamiento contraintuitivo, puntos de apalancamiento, etc. Este proceso de simplificación implicó:

- No incluir los parámetros que, según el análisis de sensibilidad, demostraron tener poca influencia en el comportamiento global del modelo.
- Disminuir el nivel de detalle espacial, ya que el modelo original dividía la zona de estudio en cuatro subzonas, cada una con parámetros y condiciones diferentes.
- Acortar el horizonte de tiempo.

El tercer paso consistió en la selección del software de modelación. Para ello, se tuvieron en cuenta tres criterios: facilidad de uso, integración con la interfaz de simulación y posibilidad de publicación en línea. Los programas bajo consideración fueron los más usados en el mercado: Vensim, Powersim Studio y Stella Architect (System Dynamics Society, n.d.). Como el modelo original se construyó en Powersim Studio, era clara la ventaja de este software en términos de facilidad de uso; sin embargo, tanto Powersim como Vensim carecen de plugins (o son muy limitados) para la creación e integración con interfaces de simulación y no tienen la opción de publicación gratis en línea. Por lo tanto, el software seleccionado fue Stella Architect.

Teniendo claros el propósito, las variables y el software, el cuarto paso consistió en hacer la formulación matemática del modelo. Para ello, se tradujo el diagrama causal a un diagrama de flujos y niveles, en el cual se clasifican las variables según si son niveles (variables de estado), flujos (variables de cambio), parámetros o auxiliares (Sterman, 2000). Cada una de estas variables se definió con una ecuación (o un valor constante en el caso de los parámetros). Para el caso de los niveles, el software definió automáticamente las ecuaciones diferenciales ordinarias según los flujos de entrada, de salida y los valores iniciales.

El quinto y último paso fue la validación del modelo, en el cual se verificó que el modelo cumpliera con el propósito definido inicialmente y que fuese lo suficientemente confiable para sus usuarios finales (Barlas, 1996; Qudrat-Ullah, 2012). Para ello, primero se hizo una validación de estructura, en la cual se evaluó “si la lógica del modelo estaba en sintonía con la estructura correspondiente en el mundo real” (Schwaninger & Groesser, 2020), y consistió en la aplicación de pruebas como examinación de la estructura del modelo, consistencia dimensional y pruebas de condiciones extremas (Sterman, 2000). Luego, se hizo una validación de comportamiento, donde se comparó el comportamiento de las variables dentro del modelo con el comportamiento en el sistema real. Estas pruebas son empíricas y se basan tanto en “datos históricos como en expectativas razonables sobre comportamientos futuros” (Schwaninger & Groesser, 2020), e incluyen pruebas como reproducción de comportamiento y análisis de sensibilidad (Sterman, 2000).

3.1.3. Construcción del entorno virtual

Una vez adaptado y validado el modelo, se procedió a construir el entorno virtual del micromundo, entendido como el conjunto de “herramientas y procedimientos necesarios para la plataforma de aprendizaje” (Marrero-Trujillo, 2020). El primer paso fue seleccionar el software. No necesariamente el entorno virtual debe hacerse en el mismo software en que se hizo el modelo, pero, como se mencionó en la sección previa, una de las mayores ventajas de Stella Architect es su capacidad para crear entornos virtuales de forma sencilla, integrarlos automáticamente con los modelos y publicarlos en línea de forma gratuita (isee systems, 2023), razón por la cual se seleccionó este software.

El segundo paso consistió en definir las variables de entrada, que en el contexto del micromundo se denominan “decisiones”, y son aquellas que los usuarios pueden manipular para influir en el sistema, mientras que las variables de salida, denominadas “resultados”, representan los efectos de estas decisiones. Para las decisiones, se identificaron aquellos parámetros del modelo sobre los cuales los tomadores de decisiones tenían gobernabilidad o capacidad de incidencia en el sistema real, y se definieron las estrategias que llevarían a cambiar esos parámetros. Para los resultados, se escogieron aquellas variables que son fundamentales para definir la sostenibilidad en la cuenca.

En el tercer paso se diseñó la interfaz gráfica del simulador. Esto incluyó tanto la parte estética (composición, paleta de colores, tipografía, etc.) como funcional. Para esta última, se definieron dos aspectos clave: (i) los mecanismos de toma de decisiones dentro del micromundo (botones, cajas de texto, barras deslizables, etc.), buscando que la experiencia de usuario fuese lo más fluida posible; y (ii) las formas de visualización de resultados, de manera que el usuario pudiese ver con facilidad y detalle el comportamiento de las variables más importantes del sistema, así como su desempeño en el juego.

El cuarto paso consistió en diseñar el material de apoyo, el cual brindaría al usuario las herramientas necesarias para usar adecuadamente el micromundo. Este paso es muy importante debido a que algunos autores han mostrado que “el juego en sí mismo no es una herramienta de aprendizaje apropiada—debe estar embebida en un entorno de aprendizaje estructurado” (Warren & Langley, 1999, p. 6), que podemos agrupar en dos partes: sesión informativa (o *briefing*) y sesión explicativa (o *debriefing*). En el *briefing* se presentaron los conceptos, ideas clave e instrucciones del juego; en el *debriefing* se abrió un espacio de debate o discusión de resultados y luego se hizo una presentación para explicar con más detalle el funcionamiento del modelo (Marrero-Trujillo, 2020). Todo el material de apoyo está dentro del micromundo, es decir, no es necesario ir a otro sitio web o recurso para acceder a él.

Finalmente, el quinto paso fue la iteración. Este, más que ser el último paso, fue una actividad

transversal a toda la metodología, y consistió en “mejorar el diseño del micromundo con recomendaciones de expertos en el campo de estudio” (Marrero-Trujillo, 2020). Para ello, se llevaron a cabo reuniones periódicas con el grupo de trabajo en las que se presentaba la herramienta y se obtenía una realimentación (no sólo del entorno virtual sino también del modelo), con el fin de refinar el micromundo tanto como fuese posible.

3.1.4. Pruebas piloto

Una vez listos el modelo y el entorno virtual, fue necesario poner a prueba el micromundo para evaluar su funcionalidad, identificar errores, oportunidades de mejora y, finalmente, evaluar su eficacia como herramienta de aprendizaje. Estas pruebas piloto se dividieron en dos instancias: pruebas alfa y pruebas beta (Marrero-Trujillo, 2020).

En las pruebas alfa, se invitó a un grupo de evaluadores para que usaran el micromundo. Estas personas tenían amplios conocimientos y experiencia en los campos temáticos en que se enfocaba la herramienta: sistemas socio-ecológicos, sostenibilidad, modelación dinámica, sistemas complejos y micromundos. Su tarea fue jugar y proporcionar comentarios y sugerencias para mejorar la experiencia del usuario final.

Luego de aplicar los ajustes recomendados en la fase alfa, se procedió con las pruebas beta, en las cuales se desarrolló toda la dinámica de juego (*briefing*, sesión de juego y *debriefing*) con un grupo de personas no expertas. El propósito de estas pruebas era recopilar datos valiosos sobre la experiencia (tiempo de juego, facilidad de uso, satisfacción general, etc.), que luego fueron usados para mejorar aún más la herramienta antes de ponerla en funcionamiento con una muestra del público objetivo.

3.2. Evaluación del aprendizaje con micromundos

Para definir la metodología de evaluación del aprendizaje, nos basamos en el trabajo de Stouten et al. (2012), quienes plantearon las dificultades que conllevaba “la falta de un marco evaluativo objetivo (basado en criterios de evaluación objetivos para aprender con micromundos) y una metodología uniforme”, y se propusieron desarrollar un marco que diese solución a este problema.

3.2.1. Conceptualización

El primer paso consiste en definir muy bien la idea de *aprendizaje*, ya que un error recurrente en la literatura especializada en micromundos es la aceptación casi inapelable de que estas herramientas potencian el aprendizaje de sistemas complejos (Miller et al., 1999), sin dejar explícito qué se entiende por aprendizaje. Esto es, cuando menos, preocupante, ya que no se

puede evaluar aquello que ni siquiera se ha definido.

De las pocas propuestas por abordar este problema, algunas de las más relevantes han sido las de Romme (2003) y Grössler (2001). El primer autor aclara que, antes que nada, hay que diferenciar entre dos tipos de aprendizaje: aprendizaje superficial y aprendizaje profundo. El primero alude a los métodos tradicionales de enseñanza, centrados en la acumulación de información y la aplicación de habilidades, mientras que el segundo implica dar un sentido a los conceptos, reinterpretar el conocimiento y cambiar como persona (Romme, 2003). El autor resalta que “si bien los micromundos pueden usarse en un contexto de aprendizaje superficial, también pueden ser de mucha ayuda para promover el aprendizaje profundo. La interacción compleja de variables y fuerzas en un micromundo reta a los estudiantes a encontrarle sentido a ciertos problemas en un contexto más amplio” (Romme, 2003, p. 3).

De forma complementaria, la propuesta de Grössler (2001) parte de la necesidad de evaluar la efectividad de los micromundos de forma rigurosa, para lo cual afirma que “el aprendizaje incluye dos procesos y el resultado de esos procesos: (1) un cambio en la estructura cognitiva (conocimiento), (2) un cambio en el comportamiento, todo lo cual conduce a (3) un cambio en el desempeño” (Grössler, 2001, citado por Stouten et al., 2012).

Ambas propuestas conceptuales de aprendizaje son similares en el sentido de que se enfocan en aspectos internos de las personas (conocimientos y actitudes) como una forma de predecir su comportamiento en el mundo real. Así, apoyado en esta concepción de lo que es aprendizaje, podemos pasar al segundo paso de la metodología: medir y analizar el aprendizaje.

3.2.2. Medición y análisis

Stouten et al. (2012) recomiendan realizar “experimentos antes-después con grupo de control”, que consisten en seleccionar una muestra del público objetivo, asignar la mitad a un grupo experimental (que utiliza el micromundo), la otra mitad a un grupo de control (que utiliza otro método o herramienta de aprendizaje), y aplicar a cada miembro de ambos grupos un cuestionario antes de la experiencia de aprendizaje y otro después. De esta manera se puede verificar si, en primer lugar, la experiencia de juego con el micromundo genera un aprendizaje significativo en los usuarios, y, en segundo lugar, si ese aprendizaje es mayor que el que se logra alcanzar con otros métodos más convencionales (Stouten et al., 2012). Sin embargo, dado que el objetivo de la presente tesis es evaluar el aprendizaje para un mismo grupo muestral en dos períodos de tiempo distintos, decidimos descartar el diseño experimental.

Ahora bien, el cuestionario es un indicador cuantitativo que se apoya en la definición de aprendizaje expuesta más arriba y se compone de tres pilares:

- conocimiento subjetivo, definido como “la percepción [de una persona] sobre la cantidad de información que tienen almacenada en su memoria” (Flynn & Goldsmith, 1999, citados por Stouten et al., 2012), y que es considerado como “un valioso sustituto del conocimiento objetivo” (Stouten et al., 2012);
- actitud hacia las decisiones, entendida como “la evaluación general de una persona hacia las decisiones [dentro del micromundo]” (Francis et al., 2004), e incluye las creencias sobre las consecuencias de las decisiones y los juicios (positivos y negativos) sobre éstas;
- intención de comportamiento, la cual se basa en la Teoría del Comportamiento Planificado para aproximar comportamientos futuros mediante la medición de intenciones y expectativas de las personas (Stouten et al., 2012, p. 3).

Para el diseño de las preguntas, se propone el uso de escalas de calificación tipo Likert, las cuales son herramientas psicométricas que miden atributos subjetivos como motivación, percepción, autoconfianza, etc., y que tienen una amplia acogida en el ámbito de la investigación educativa (Nemoto & Beglar, 2014; Sullivan & Artino Jr., 2013). En el caso de nuestra investigación, los atributos a medir (también llamados *constructos*) son el conocimiento subjetivo, la actitud hacia las decisiones y la intención de comportamiento, de modo que, para cada uno, se define un conjunto de ítems calificables en una escala ordinal, donde el valor menor equivale a una opinión negativa (por ejemplo, totalmente en desacuerdo), mientras que el valor mayor corresponde a una opinión positiva (p. ej., totalmente de acuerdo) (Nemoto & Beglar, 2014). El respondedor puede seleccionar el número entero dentro de esa escala que mejor se ajuste a su percepción.

Stouten et al. (2012) emplean escalas de siete puntos o categorías, las cuales permiten seleccionar una opción de neutralidad en escenarios donde, por ejemplo, los participantes no estén familiarizados con el tema (South et al., 2022). Además, se recomienda que cada ítem aluda a la misma idea o constructo usando una redacción diferente, que los enunciados sean directos, fáciles de entender y que todos estén redactados en el mismo tono (por lo general, se usa un tono afirmativo) (Nemoto & Beglar, 2014).

De cada cuestionario se obtiene un puntaje promedio por componente, los cuales permiten: (i) comparar los resultados del primer cuestionario con el segundo para verificar si hubo aprendizaje con el micromundo, y (ii) analizar el efecto de las características de los actores sobre su aprendizaje. Para comprobar si el micromundo generó un cambio significativo en el aprendizaje del grupo muestral, se llevó a cabo la prueba *t* de Student apareada (también llamada “prueba *t* con muestra dependiente”), la cual se recomienda para “comparar dos o más medias grupales donde los participantes son los mismos en cada grupo” (Hsu & Lachenbruch, 2014). En la siguiente sección se describe el análisis de las características de los actores sobre su aprendizaje.

3.2.3. Características de los actores

El enfoque de transdisciplinariedad propone que la generación de conocimiento sea un proceso co-producido en el que participen personas de diferentes trasfondos (Holzer et al., 2019). Esos trasfondos se pueden mirar desde varias perspectivas o categorías. En la Tabla 3-1 se muestran las categorías propuestas, las distintas características que las conforman, y las hipótesis del efecto que cada una puede tener sobre el aprendizaje del público objetivo.

Tabla 3-1.: Características de los actores.

Categoría	Característica	Hipótesis
Demografía	Género	La familiaridad y comodidad con la tecnología pueden variar entre los géneros, influyendo en cuánto aprenden los participantes al interactuar con el micromundo (Gupta, 2014)
	Edad	Los participantes más jóvenes tienen mayor familiaridad con la tecnología y mayor sensibilidad por asuntos ambientales, por tanto, pueden aprender más al interactuar con el micromundo (Huber & Watson, 2014; Piscitelli & D'Uggento, 2022)
	Estructura familiar	Las personas con hijos pueden estar más motivadas para aprender sobre sostenibilidad para asegurar un futuro mejor para sus hijos, lo que podría aumentar su aprendizaje al interactuar con el micromundo (Milfont & Sibley, 2011)
Educación y formación	Nivel educativo	Los participantes con un mayor nivel educativo podrían tener una mayor capacidad para comprender los conceptos presentados en el micromundo (Ito & Kawazoe, 2018)
	Formación en temas ambientales	Los participantes que han tenido alguna formación en temas ambientales podrían tener un mayor nivel de aprendizaje al interactuar con el micromundo (van de Wetering et al., 2022; Wals & Benavot, 2017)

Tabla 3-1.: Características de los actores.

Categoría	Característica	Hipótesis
Contexto socioeconómico	Ocupación	Dependiendo de la ocupación del individuo, su grado de aprendizaje al interactuar con el micromundo puede variar, siendo posiblemente mayor en aquellos con ocupaciones relacionadas con temas ambientales o los estudiantes (Lieb, 2022)
	Sector en que más ha trabajado	Los participantes que han trabajado en sectores relacionados con la gestión ambiental podrían obtener un mayor nivel de aprendizaje (Lieb, 2022)
	Ingresos mensuales	Los ingresos mensuales podrían afectar el acceso a la educación y a la tecnología, factores que pueden influir en el aprendizaje al interactuar con el micromundo (Ito & Kawazoe, 2018)
Ubicación geográfica	Zona rural o urbana	Dependiendo de si viven en una zona rural o urbana, los participantes pueden tener diferentes experiencias con temas ambientales, lo que podría influir en su aprendizaje (Dabrowski et al., 2022)
	Cuenca en la que vive	No todos los actores de un SSEC viven en ese SSEC. Se espera un mayor aprendizaje de aquellas personas que vivan en la cuenca hidrográfica seleccionada (Masterson et al., 2017)
	Tiempo de residencia	Los participantes que han vivido más tiempo en una zona pueden tener una mayor comprensión de los problemas ambientales locales, de modo que el aprendizaje logrado será mayor para quienes lleven más años en la cuenca (Eisenhart et al., 2019)
Preferencias personales	Pertenencia a organizaciones ambientales	Los participantes que son miembros de organizaciones ambientales pueden tener una mayor sensibilidad a los temas del micromundo, de modo que su aprendizaje será mayor que quienes no pertenezcan a estas organizaciones (Wolbring & Gill, 2023)

Tabla 3-1.: Características de los actores.

Categoría	Característica	Hipótesis
	Familiaridad con juegos de simulación	Aquellos que ya están familiarizados con juegos de simulación podrían aprender más al interactuar con el micromundo debido a su experiencia previa (Stouten et al., 2012)

Para corroborar la veracidad de estas hipótesis, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de diseño mixto, el cual evalúa el efecto aislado y combinado de dos variables independientes sobre el aprendizaje: una variable dentro de sujetos (en inglés, *within-subjects*), equivalente al uso del micromundo, y otra variable entre sujetos (*between-subjects*), equivalente a las características expuestas en la Tabla 3-1.

3.3. Puesta en funcionamiento

Habiendo completado el diseño del micromundo y los instrumentos de recolección de datos, se puso a prueba la herramienta mediante una serie de talleres con una muestra del público objetivo. Esto se hizo en cuatro pasos:

1. Se seleccionó la zona de estudio, es decir, el sistema socio-ecológico de interés. La cuenca hidrográfica seleccionada fue la del Río Negro, en la subregión del Oriente Antioqueño. El motivo de esta elección fue la similitud de esta cuenca con la del Río Grande y Chico, en la que se basó el modelo original. Ambas cuentan con un embalse que suple de agua a varios municipios circundantes (Berrio-Giraldo et al., 2021; Román-Botero et al., 2010), tienen una precipitación media anual cercana a los 2200 mm (Berrio-Giraldo et al., 2021; CORNARE, 2016), temperatura media alrededor de los 16°C (CORANTIOQUIA & UNAL, 2015; CORNARE, 2016), son cercanas al segundo epicentro económico más importante del país, el Valle de Aburrá, han sufrido cambios de uso de suelo importantes en las últimas décadas y han experimentado un crecimiento urbano acelerado (CORANTIOQUIA & UNAL, 2015; CORNARE, 2016). Todo esto convierte a la cuenca del Río Negro en un SSEC de alto interés para poner a prueba el micromundo.
2. Se seleccionó una muestra del público objetivo, buscando una alta representación de las características expuestas en el capítulo anterior. Para ello, se seleccionó una de las unidades territoriales definidas en el POMCA del Río Negro, específicamente, la unidad territorial conformada por los municipios de El Retiro, La Ceja y Envigado, la cual ocupa casi un tercio del área total de la cuenca y es de importancia estratégica ya que ahí “se ubican las áreas de recarga hídrica que dan forma al Río Negro” (CORNARE,

2016, p. 5). Se hizo un sondeo inicial de potenciales participantes en los tres municipios, encontrando en La Ceja una mayor accesibilidad y disponibilidad por parte de los actores en relación con los otros municipios.

3. Se realizó un primer acercamiento a la Subsecretaría de Ambiente de La Ceja para presentar el proyecto y solicitar apoyo en la convocatoria de diferentes actores. Con ellos se establecieron varios puentes de comunicación con una amplia diversidad de actores (educativos, institucionales, comunitarios, etc.), a quienes se hizo la invitación de forma presencial o por teléfono. A los actores que no se pudo alcanzar por estos medios, se les envió una carta de invitación vía correo electrónico o WhatsApp.
4. Se llevó a cabo una serie de talleres con el micromundo. La duración de cada taller fue de aproximadamente 1.5–2 horas, con una participación máxima de 12 personas por taller. La dinámica propuesta fue un juego de roles, en el cual los participantes eran los únicos tomadores de decisiones de una cuenca ficticia, reunidos en una sesión extraordinaria para tomar las decisiones que permitirían que la cuenca fuese sostenible. Los participantes debían analizar las decisiones que se les presentaban y llegar a un consenso sobre las decisiones a tomar durante cuatro rondas, que abarcaban el tiempo de simulación del micromundo. Un moderador guiaba todo el juego, proyectando la interfaz del micromundo, ingresando las decisiones que le indicasen los participantes y presentando los resultados o efectos de dichas decisiones sobre los indicadores de sostenibilidad. Antes y después del juego se aplicaban los respectivos cuestionarios para la recolección de datos.

4. ORBEM: un micromundo para la sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos de cuenca

En este capítulo se muestran los resultados de la construcción del micromundo, el cual se nombró como “ORBEM”, y está disponible en línea a través del siguiente enlace: <https://t.ly/0eWN/>. En la Sección 4.1 se presenta el objetivo de aprendizaje y el público objetivo. En la Sección 4.2 se describe todo el proceso de adaptación y construcción del modelo dinámico. Finalmente, la Sección 4.3 muestra el desarrollo del entorno virtual del micromundo.

4.1. Objetivo de aprendizaje y público objetivo

La definición del objetivo de aprendizaje atravesó diferentes versiones, fruto de múltiples reuniones con el equipo de trabajo. Inicialmente, se planteó el micromundo como una herramienta que enseñara al usuario el carácter contraintuitivo de los SSE frente a la toma de decisiones. El problema de esta definición era que no necesariamente los efectos serían siempre contraintuitivos, con lo cual el micromundo no cumpliría con su propósito.

Por esta razón, en lugar de hablar de comportamiento contraintuitivo, se planteó el micromundo como una herramienta donde la toma de decisiones genera *trade-offs* y sinergias que, eventualmente, afectan la sostenibilidad del sistema. Además, se buscó el estilo de redacción de objetivos de aprendizaje de otros micromundos, y se tomó como referencia el definido en el juego de la cerveza, el cual ha sido probado extensamente desde hace décadas en todo el mundo (MIT Sloan, 2022). Si bien este fue el objetivo de aprendizaje escogido inicialmente, cuando se realizaron las pruebas piloto se encontró que los jugadores realmente no estaban adquiriendo un aprendizaje sobre *trade-offs* y sinergias. Esto condujo a que el objetivo se plantease únicamente en términos de los efectos de las decisiones sobre la sostenibilidad del SSE, con lo cual se redactó de la siguiente manera:

La experiencia permitirá al usuario entender que: (i) las decisiones que toman las personas en un SSE tienen efectos directos e indirectos sobre su sostenibilidad, y (ii) diferentes decisiones tienen efectos de magnitudes diferentes sobre el SSE.

En cuanto al público objetivo, desde el inicio se buscó que el micromundo estuviese disponible a una audiencia con injerencia en los territorios, pero también que fuese una herramienta con fines pedagógicos y divulgativos para la comunidad educativa. Con esto presente, y apoyándonos también en la sección de aprestamiento del POMCA de Río Negro para el municipio de La Ceja, se definieron los siguientes actores como público objetivo del micromundo:

- Autoridades ambientales (Corantioquia y Cornare)
- Administración municipal
- Empresas de servicios públicos
- Gremios de productores
- Organizaciones ambientales
- Instituciones educativas

4.2. Construyendo el modelo

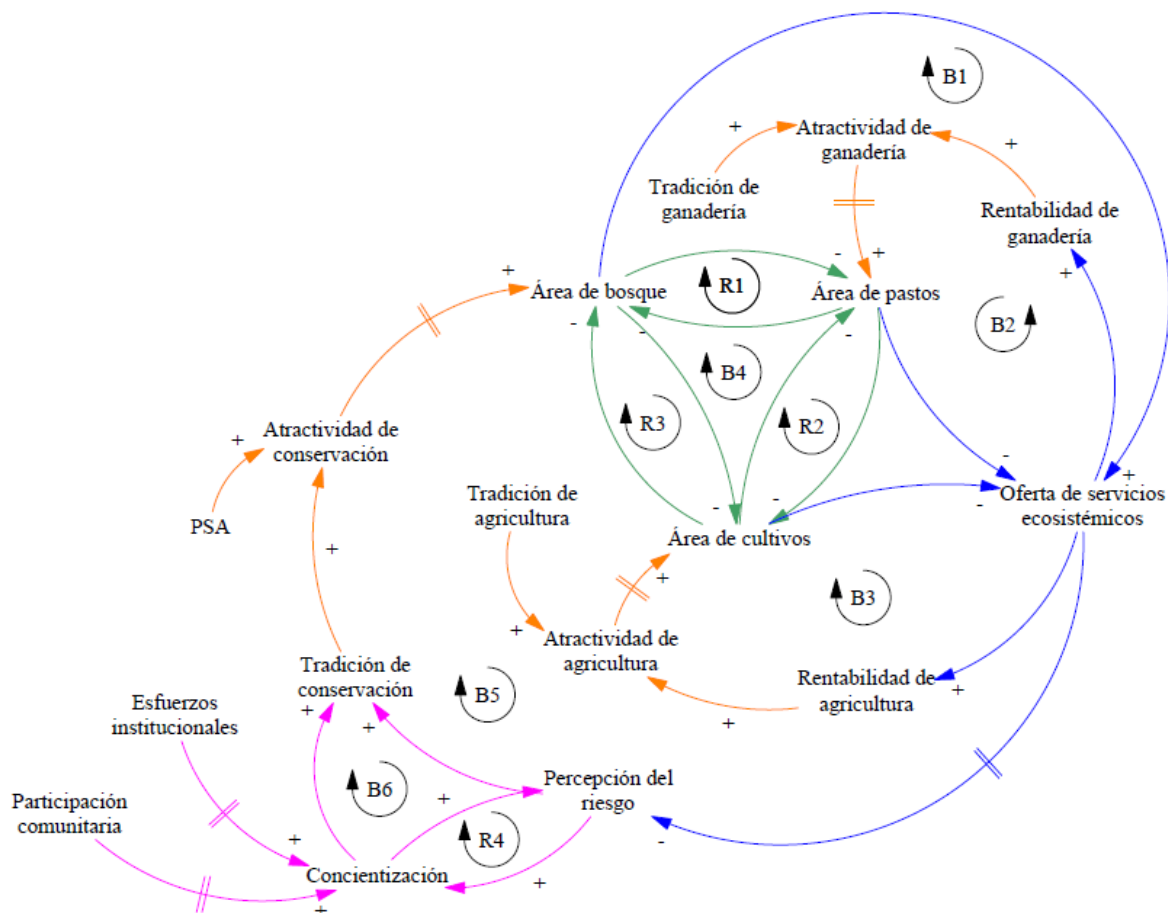
En este capítulo se describe todo el proceso de adaptación y construcción del modelo dinámico, empezando por la conceptualización del sistema mediante un diagrama causal, siguiendo con la formulación matemática del modelo, así como su posterior validación para asegurar que cumple con el propósito establecido.

4.2.1. Conceptualización

Según se mencionó en el Capítulo 3.1, el modelo de partida del micromundo es el desarrollado por Berrio-Giraldo (2020). Como parte del proceso de adaptación del modelo, se propone en la Figura 4-1 una conceptualización simplificada del sistema mediante un diagrama causal¹. Este diagrama incluye las principales variables y sus relaciones de causalidad, así como los ciclos de realimentación creados entre ellas. Los colores de las flechas representan los módulos en los que se agrupan las variables, a saber, módulo de coberturas (verde), módulo de decisiones (naranja), módulo de servicios ecosistémicos (azul) y módulo social-institucional (fucsia). Esta organización por módulos es tomada y modificada de Berrio-Giraldo (2020), y es una forma muy práctica de visualizar el modelo.

¹Cada flecha tiene un signo asociado (+ o -) que representa la relación entre las variables de la siguiente manera: $x \rightarrow^+ y \implies \frac{\partial y}{\partial x} > 0$ y $x \rightarrow^- y \implies \frac{\partial y}{\partial x} < 0$ (Berrio-Giraldo, 2020). Además, las dos líneas paralelas en medio de algunas flechas implican que hay un retardo en el tiempo que tarda una variable en tener efecto sobre otra (Sterman, 2000).

Figura 4-1.: Diagrama causal del SSEC modelado.



Fuente: elaboración propia a partir de Berrio-Giraldo (2020).

Los primeros ciclos de realimentación son de balance² (B1, B2 y B3), y representan el efecto de las tres principales coberturas de suelo de la cuenca (bosques, pastos y cultivos) sobre la oferta de servicios ecosistémicos (control de la erosión y oferta de agua superficial): el efecto de los bosques es positivo, mientras que el de pastos y cultivos es negativo. También muestran el efecto restrictivo de los servicios ecosistémicos (SE) sobre las coberturas, es decir, que una cobertura puede aumentar tanto como la oferta de agua y el control de la erosión lo permitan. Esto se explica en la medida en que el agua y el suelo son factores determinantes de la productividad de la ganadería y la agricultura y, por tanto, de sus rentabilidades. De esta forma, al aumentar la rentabilidad de las actividades económicas, aumentará la atraktividad de sus coberturas asociadas y, eventualmente, su área, volviendo a empezar el ciclo.

²Los ciclos de balance (o negativos) “contrarrestan y se oponen al cambio. (...) describen procesos que tienden a auto-limitarse, procesos que buscan balance y equilibrio” (Sterman, 2000, p. 12). Se representan con la letra B.

El ciclo de balance B4 y los ciclos de refuerzo³ R1, R2 y R3 muestran las dinámicas entre las coberturas de suelo. Por un lado, los ciclos de refuerzo indican que, de no haber restricciones de espacio, una cobertura determinada podría crecer indefinidamente. Sin embargo, esto es limitado por el ciclo de balance, ya que el área de la cuenca es finita, por lo cual un aumento en una cobertura se da a costa de una disminución en otra. Esta “lucha” entre las coberturas es constante, y dependerá esencialmente de la atractividad de cada una, la cual se define con base en dos criterios: (i) rentabilidad de la actividad económica asociada a cada cobertura, entendida como la diferencia entre ingresos y costos totales; y (ii) tradición de la actividad económica, la cual “involucra todos los factores culturales y/o valores intrínsecos que existen en torno a cada cobertura vegetal y que se transmiten de generación en generación dentro de una comunidad” (Berrio-Giraldo, 2020, p. 65).

Los ciclos B5 y B6 son fundamentales porque introducen el módulo social-institucional y sus conexiones con el resto de los módulos. Específicamente, el módulo social-institucional se caracteriza por no considerar “Tradición de conservación” como una variable exógena (como sí sucede con la tradición de ganadería y de agricultura), sino que se define de forma endógena a partir de dos variables muy importantes: concientización y percepción social del riesgo (PSR). La concientización se define como “el grado de importancia que las personas otorgan al cuidado del medio ambiente en la cuenca, lo cual se ve reflejado en iniciativas de conservación y restauración [de bosques]” (Congote & Builes, 2020, p. 19), y es el resultado de esfuerzos institucionales y de la participación comunitaria. Por otro lado, la PSR “refleja la creencia de un individuo en relación con su exposición y vulnerabilidad frente a ciertas amenazas” (Bolaños-Valencia et al., 2019), que para el caso presente corresponden al deterioro de los SE. De esta manera, si la percepción de las personas es que hay una disminución en la oferta de servicios ecosistémicos, esto aumentará la PSR, lo cual a su vez aumentará la tradición de conservación. Finalmente, el ciclo R4 representa la sinergia entre concientización y PSR: a mayor concientización, mayor sensibilidad de los habitantes frente al deterioro de los servicios ecosistémicos y, por tanto, mayor PSR; al mismo tiempo, una mayor PSR mueve a la comunidad a tomar acciones para remediar el daño a los SE, principalmente mediante procesos de sensibilización hacia los habitantes.

4.2.2. Formulación matemática

Con base en el diagrama causal de la sección anterior, se construyó un diagrama de flujos y niveles en Stella Architect, asignando las respectivas ecuaciones a cada variable. El modelo se construyó con un horizonte de tiempo entre los años 1997 y 2040, con un paso de tiempo

³Los ciclos de refuerzo (o positivos) “tienden a reforzar o amplificar lo que esté sucediendo en el sistema. (...) son procesos que generan su propio crecimiento” (Sterman, 2000, p. 12). Se representan con la letra R.

diario. Se escogió este paso de tiempo debido a que varios datos de entrada del módulo hidrológico venían dados en dicha escala. Dado que este módulo era fundamental en la estructura del modelo, se decidió mantener el paso de tiempo, buscando, además, capturar la variabilidad climática de la cuenca lo mejor posible. El modelo es bastante extenso, razón por la cual se presentarán los resultados por módulos y sólo se incluirán las principales variables. Para consultar variables adicionales, remitirse al Anexo A.

- Módulo de coberturas:** en este módulo se representan las tres principales coberturas de suelo como niveles (o variables de estado): área de cultivos (C), área de pastos (P) y área de bosques (B) (ver Ecs. 4-2, 4-3, 4-4). Como quedó evidenciado en el diagrama causal, las tres coberturas “compiten” entre sí para establecer su prevalencia en la cuenca. Esto se modela mediante variables de flujo definidas como “Tasas de conversión $i \rightarrow j$ ” ($TC_{i \rightarrow j}$), las cuales determinan el ritmo al que aumenta una cobertura j a costa de una disminución en otra cobertura i (Ec. 4-1)⁴. Esta tasa de conversión va a depender del área deseada de cada cobertura, la cual, a su vez, es función de la atractividad de cada cobertura, explicada en el siguiente módulo.

$$TC_{i \rightarrow j} \left[\frac{\text{ha}}{\text{día}} \right] = \frac{MIN(\text{área deseada}_j - \text{área actual}_j; \text{área actual}_i)}{\text{tiempo de transición}_{i \rightarrow j}} \quad (4-1)$$

$$C(t)[\text{ha}] = C(0) + \int_0^t (TC_{P \rightarrow C} + TC_{B \rightarrow C} - TC_{C \rightarrow P} - TC_{C \rightarrow B}) dt \quad (4-2)$$

$$C(0) = 2104,0$$

$$P(t)[\text{ha}] = P(0) + \int_0^t (TC_{C \rightarrow P} + TC_{B \rightarrow P} - TC_{P \rightarrow C} - TC_{P \rightarrow B}) dt \quad (4-3)$$

$$P(0) = 57097,8$$

$$B(t)[\text{ha}] = B(0) + \int_0^t (TC_{C \rightarrow B} + TC_{P \rightarrow B} - TC_{B \rightarrow C} - TC_{B \rightarrow P}) dt \quad (4-4)$$

$$B(0) = 32640,4$$

- Módulo de decisiones:** la principal variable de este módulo es la atractividad (α) de cada cobertura, entendida como la proclividad de los tomadores de decisiones hacia una cobertura determinada (Berrio-Giraldo et al., 2021). Se define dentro del modelo a través de una función logit multinomial (Ec. 4-5), la cual estima la probabilidad de

⁴ $MIN(x; y)$ es una función integrada en Stella que escoge el menor valor entre x e y

transitar hacia una cobertura dados unos criterios de elección o variables explicativas (Cramer, 2003). Esos criterios son rentabilidad y tradición.

$$\alpha_m[\%] = \frac{e^{\beta_m \cdot \mathbf{x}_i}}{\sum_{j=1}^{M=3} e^{\beta_j \cdot \mathbf{x}_i}} * 100 \quad (4-5)$$

Donde $M = 3$ corresponde a las alternativas o categorías evaluadas (i.e., bosque, pasto y cultivo), m es la cobertura que se esté evaluando en ese momento, β es el vector de coeficientes de regresión y \mathbf{x} es el vector de criterios o variables explicativas para cada observación i .

La rentabilidad de la agricultura se calculó como la diferencia entre los ingresos y costos totales de la agricultura de papa y de tomate de árbol, que son las dos especies más cultivadas en la cuenca de Río Grande y Chico (CORANTIOQUIA & UNAL, 2015). Este cálculo tuvo en cuenta productividad [kg/ha], precios y costos de producción [\$/kg] históricos de cada cultivo. En cuanto a la rentabilidad de la ganadería, también se definió como la diferencia entre ingresos y costos totales, estimada a partir de la capacidad de carga [cabezas de ganado/ha], precio y costo de producción [\$/L] histórico de la leche.

Por otro lado, el criterio de tradición se definió como un parámetro, tanto para ganadería como para agricultura, es decir, sus valores son constantes a lo largo de toda la simulación. Estos parámetros son adimensionales, toman valores entre 0 y 5, y se estimaron a partir de los hallazgos de investigaciones previas realizadas en la cuenca (Berrio-Giraldo et al., 2021). En cuanto a la tradición de conservación de bosques, esta sí se consideró como una variable endógena, modelada a partir de factores sociales explicados más adelante.

- **Módulo de servicios ecosistémicos:** las dos variables principales de este módulo son la oferta de agua superficial (O) y el control de la erosión (CE). La oferta de agua se calculó mediante cinco variables de estado a partir del Modelo de Simulación Hidrológica Abierta propuesto por Vélez (2001): interceptación, almacenamiento capilar, almacenamiento superficial, almacenamiento subsuperficial y aguas subterráneas (Berrio-Giraldo, 2020). Cada uno de los niveles representa un “tanque”, de modo que el agua fluye de un tanque a otro en función de la precipitación y de características propias de las coberturas, del suelo y del relieve (Berrio-Giraldo, 2020). Los flujos de salida de los tanques de almacenamiento superficial, almacenamiento subsuperficial y aguas subterráneas son la escorrentía superficial, la escorrentía subsuperficial y el flujo base, respectivamente. La suma de los tres flujos de salida es igual a la oferta de agua (Ec. 4-6).

$$O[\text{mm/día}] = \text{esc. superficial} + \text{esc. subsuperficial} + \text{flujo base} \quad (4-6)$$

La tasa de erosión se estimó mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (*RUSLE*, por sus siglas en inglés), la cual permite “predecir las pérdidas medias anuales de sedimentos” (Mohammed et al., 2020) mediante el producto de cinco factores que representan las características hidrológicas, edafológicas, topográficas, de vegetación y de usos de suelo de la cuenca (Ec. 4-7). Sin embargo, el servicio ecosistémico *per se* no es la tasa de erosión, sino el control de la erosión (*CE*, ver Ec. 4-8), entendido como “la capacidad de la vegetación [...] para mantener el suelo en su lugar” (Arango, 2021) y definido como la diferencia entre la tasa de erosión máxima ($E_{m\acute{a}x}$) y la tasa de erosión real (E_r).

$$E_r[\text{ton/día/ha}] = R * K * LS * F_C * F_P \quad (4-7)$$

$$CE[\text{ton/día/ha}] = E_{m\acute{a}x} - E_r \quad (4-8)$$

Donde R es el factor de erosividad de la lluvia, K es el factor de erodabilidad del suelo, LS es el factor topográfico, F_C es el factor de cobertura y F_P es el factor de prácticas de manejo (Arango, 2021; Berrio-Giraldo, 2020).

- **Módulo social-institucional:** este último módulo se basa en el trabajo de Congote & Builes (2020), quienes complementaron el modelo original de Berrio-Giraldo (2020) luego de destacar el valor del capital social⁵ para la gestión sostenible de los SSE, alertando sobre la poca representación que tiene este capital en la mayoría de los modelos de SSE, los cuales ponen la mayor parte de su atención en los procesos ecológicos (Congote & Builes, 2020). Las principales variables de este módulo son concientización, percepción social del riesgo (PSR), tradición de conservación y aceptabilidad.

Por un lado, “Concientización” (*Con*) se define como una variable de flujo (Ec. 4-9), que depende de dos factores: (i) población alcanzada (PA), medida como el número de personas que participan en temas de educación ambiental, a cargo tanto de la autoridad ambiental como de otras organizaciones ambientales (Congote & Builes, 2020); y (ii) articulación entre actores (AA), que representa el grado de sinergia entre los distintos actores de la cuenca a la hora de tomar decisiones para su gestión (Congote & Builes, 2020). Este flujo de concientización alimenta al nivel llamado “Población concientizada” (P_C , ver Ec. 4-10), que se interpreta como el número de personas en la cuenca que logran ser educadas en temas ambientales.

⁵Los autores definen capital social como “las relaciones de confianza, reciprocidad, reglas comunes, normas, sanciones y conexión entre las instituciones” (Congote & Builes, 2020).

$$Con[\text{personas/día}] = MIN \left(\frac{PA}{t_r} * AA; \frac{P_T - P_C}{DT} \right) \quad (4-9)$$

$$P_C[\text{personas}] = P_C(0) + \int_0^t (Con)dt \quad (4-10)$$

$$P_C(0) = 9856,5$$

Donde PA es la población alcanzada, AA es la articulación entre actores, t_r es el tiempo que tarda en surtir efecto los procesos de educación, P_T es la población total de la cuenca, P_C es la población concientizada y DT es el paso de tiempo de la simulación. La función $MIN()$ garantiza que P_C no exceda la población total de la cuenca.

La PSR se definió como una variable de estado (Ec. 4-12), que aumenta a partir de la variable de flujo “Cambio en la PSR” (Δ_{PSR}). Esta última es función de la amenaza por déficit de agua (A_{agua}), la amenaza por pérdida de suelo ($A_{erosión}$) y el porcentaje de personas concientizadas en toda la cuenca (Ec. 4-11)⁶. Si la erosión aumenta por encima del promedio histórico, esto generará una alarma en los habitantes y aumentará su PSR; por otro lado, si la erosión es muy baja o cercana a cero, no existirá ninguna alarma, lo cual disminuirá la PSR. El mismo razonamiento aplica para la oferta de agua.

$$\Delta_{PSR}[\text{día}^{-1}] = MAX \left([A_{agua} * 0,65 + A_{erosión} * 0,35] * \Phi; \frac{-PSR}{DT} \right) \quad (4-11)$$

$$PSR[\text{adim.}] = PSR(0) + \int_0^t (\Delta_{PSR})dt \quad (4-12)$$

$$PSR(0) = 427,5$$

Donde A_{agua} es la amenaza por déficit de agua, $A_{erosión}$ es la amenaza por pérdida de suelo, $\Phi = P_C/P_T$ es el porcentaje de personas concientizadas en toda la cuenca, PSR es la percepción social del riesgo y DT es el paso de tiempo de la simulación. Los coeficientes 0.65 y 0.35 son ponderaciones que “representan el nivel de importancia del parámetro o variable (...). Los valores fueron estimados a partir de entrevistas con expertos sobre temas relacionados con capital social y gobernanza en la zona de estudio” (Builes et al., 2022).

⁶La función $MAX(x; y)$ escoge el mayor valor entre x e y .

La tercera variable importante de este módulo es “Tradición de conservación” ($trad_C$), que se refiere a “todos los factores culturales e intrínsecos que afectan la toma de decisiones de los tenedores de tierra” (Builes et al., 2022), y en particular “la apreciación de los bosques por los diferentes beneficios que ofrece” (Builes et al., 2022). Esta apreciación aumentará en la medida en que las personas sean más conscientes del aporte de los bosques al mantenimiento de los SE, y tengan una mayor percepción del riesgo frente al deterioro de los SE (Ec. 4-13)⁷.

$$trad_c[\text{adim.}] = GRAPH(\Phi * [1 + PSR_n]) \quad (4-13)$$

Donde $\Phi = P_C/P_T$ es el porcentaje de personas concientizadas y PSR_n es la percepción social del riesgo normalizada.

La última variable a destacar de este módulo es “Aceptabilidad” (Ac), que se refiere a “la acogida que tienen las políticas de comando y control en los residentes de la cuenca” (Congote & Builes, 2020). Como dichas políticas conducen a restricciones de uso de suelo en favor de la conservación, esto genera descontento en la comunidad ya que se limitan las actividades económicas permitidas en una zona. Para que haya una mayor aceptabilidad, es necesario: (i) una alta participación de la comunidad en la toma de decisiones, en el desarrollo e implementación de políticas en los territorios (Builes et al., 2022), ya que esto daría más legitimidad a las restricciones; (ii) un alto nivel de confianza hacia la autoridad ambiental, que es la encargada de velar por el cumplimiento de las políticas de comando y control; y (iii) una alta atractividad de bosque, ya que si los tenedores de tierra en la cuenca tienen una mayor preferencia hacia esta cobertura, no tendrán inconvenientes frente a políticas que favorezcan su área (Ec. 4-14). Por otro lado, la aceptabilidad se ve reducida por el efecto restrictivo que tuvo la implementación de regulaciones formales en la cuenca, como el Distrito de Manejo Integrado (DMI) en el año 2010 que abarcó varios municipios, y el Sistema Local de Áreas Protegidas (SILAP) en Santa Rosa de Osos⁸.

$$Ac[\text{adim.}] = MAX \left(Pa * 0,25 + \alpha_B * 0,25 + NC * 0,25 - \left[\frac{A_{prot}}{A_T} \right] * 0,25; 0 \right) \quad (4-14)$$

⁷La función *GRAPH* permite “especificar una relación a partir de una tabla de valores para la variable dependiente e independiente” (Sterman, 2000).

⁸Los DMI son una de las categorías de áreas protegidas en Colombia definidas por el Decreto 2372 de 2010. Por otro lado, los SILAP, aunque no forman parte de estas categorías, se definen como “el elemento central del ordenamiento territorial y ambiental municipal, (...) [que incluye] áreas de especial importancia ecosistémica de carácter público o privado” (Acuerdo 008 de 2017, Concejo Municipal de Santa Rosa de Osos).

Donde Pa es la participación ciudadana en la toma de decisiones, α_B es la atractividad de bosques, NC es el nivel de confianza hacia la autoridad ambiental, A_{prot} es el área protegida en la cuenca, y A_T es el área total de la cuenca. Al igual que con la variable “Cambio en la PSR”, los coeficientes en esta ecuación fueron estimados mediante consulta a expertos. La función $MAX()$ evita que la aceptabilidad tome valores negativos.

Finalmente, uno de los cambios más importantes respecto al modelo original fue la adición de la variable “Sostenibilidad” (S). Esta variable se definió a partir del marco conceptual y operativo de sostenibilidad propuesto por Gómez-Jaramillo (2023), el cual también usa la cuenca de Río Grande y Chico como caso de estudio. La autora propuso una batería de indicadores que, en su conjunto, definen un tablero de control y permiten estimar el estado de sostenibilidad de la cuenca. Para ello, se mira si los indicadores están dentro de unos valores o umbrales que representan los límites ecológicos y la base social.

En la Ec. 4-15, los límites ecológicos corresponden a los servicios ecosistémicos, y ambos deben estar en buen estado (es decir, dentro de los umbrales definidos) simultáneamente para garantizar la integridad del capital natural. Si no se cumple esta condición, automáticamente la cuenca pasa a un estado no sostenible ($S = 0$), ya que se emplea un enfoque de sostenibilidad fuerte, donde el capital natural es insustituible, es decir, se reconoce que ni la economía ni la sociedad pueden existir ni desarrollarse por fuera de la naturaleza (Morandín-Ahuerma et al., 2019; Neumayer, 2013).

Por otra parte, si la condición de límites ecológicos se cumple, la cuenca transita a un estado de sostenibilidad parcial ($S = 1$), y la función pasa a evaluar los indicadores socio-económicos. Estos últimos corresponden a la aceptabilidad, nivel de confianza, porcentaje de personas concientizadas y rentabilidad de las actividades económicas, los cuales forman parte de los niveles que Gómez-Jaramillo (2023) definió para la base social: sustento económico y aspectos sociales. De esta manera, si todos los indicadores socioeconómicos se encuentran en buen estado (i.e., por encima de los umbrales) de forma simultánea, la cuenca pasará a un estado de sostenibilidad ($S = 2$).

$$\begin{aligned}
 S[\text{adim.}] = & \text{IF } (CE < U_E \text{ OR } O < U_O) \\
 & \text{THEN } 0 \\
 & \text{ELSE} \\
 & \quad \text{IF } \left(A_c < U_{A_c} \text{ AND } NC < U_{NC} \text{ AND } \Phi < U_\phi \text{ AND } \sum \text{Rent.} < 0 \right) \\
 & \quad \text{THEN } 1 \\
 & \quad \text{ELSE } 2
 \end{aligned} \tag{4-15}$$

Donde CE es el control de la erosión, O es la oferta de agua superficial, Ac es aceptabilidad, NC nivel de confianza, Φ es el porcentaje de personas concientizadas, $\sum Rent.$ es la suma de rentabilidades de las actividades económicas de la cuenca, y U_i equivale a los umbrales definidos por Gómez-Jaramillo (2023) para cada indicador i . Si $S = 0$, la cuenca no es sostenible; si $S = 1$, la cuenca es parcialmente sostenible; y si $S = 2$, la cuenca es sostenible.

4.2.3. Validación

La validación es un procedimiento crucial en la modelación de dinámica de sistemas, ya que garantiza que el modelo elaborado cumple con el propósito inicialmente definido y que es fiable para su uso por los usuarios finales (Barlas, 1996). En otras palabras, la validación es la etapa en la que se verifica que el modelo es una representación precisa y útil del sistema real que está tratando de emular. Esta etapa se abordó en dos niveles: validación de estructura y validación de comportamiento.

Para la validación de estructura se realizaron las siguientes pruebas:

1. **Verificación de estructura:** se hizo una revisión de la evidencia empírica y teórica que da evidencia de la estructura del sistema. El modelo original es el resultado de numerosas investigaciones que se han realizado en la cuenca de estudio (p. ej., los trabajos de Arango (2021), Berrouet et al. (2020), Bolaños-Valencia et al. (2019), Marsiglia (2017), entre otros), de manera que todas las relaciones causales tienen un fuerte respaldo teórico. Adicionalmente, se realizó consulta a diferentes expertos con amplio conocimiento del sistema, quienes confirmaron la validez de las variables definidas y sus interacciones.
2. **Consistencia dimensional:** se analizó si “cada ecuación en el modelo correspondía dimensionalmente al sistema real” (Quadrat-Ullah, 2012). Este procedimiento se hizo de forma manual para cada variable, pero también se usó la funcionalidad integrada de Stella Architect, la cual permite al usuario “asegurarse que ambos lados de las ecuaciones tengan unidades consistentes, y que los niveles en cadenas de flujo conservadas tengan todas las mismas unidades de medida” (isee systems, n.d.). Los resultados arrojaron que todas las ecuaciones eran dimensionalmente consistentes.
3. **Prueba de condiciones extremas:** esta prueba consiste en seleccionar algunos parámetros y asignarles valores extremos para analizar si su efecto sobre el modelo genera un comportamiento lógico y esperado. Los parámetros evaluados fueron los valores iniciales de las coberturas, ingresando para cada cobertura un valor inicial del 100% del área total de coberturas. Según se observa en la Tabla 4-1, los resultados fueron coherentes, ya que, para cada caso, las coberturas fueron dominantes durante los primeros años de la simulación, hasta que los procesos internos del modelo las llevaban a un punto de equilibrio. Además, los efectos de cada cobertura sobre los servicios

ecosistémicos fueron los esperados. Para visualizar con más detalle los resultados de esta prueba de validación, remitirse al Anexo B.

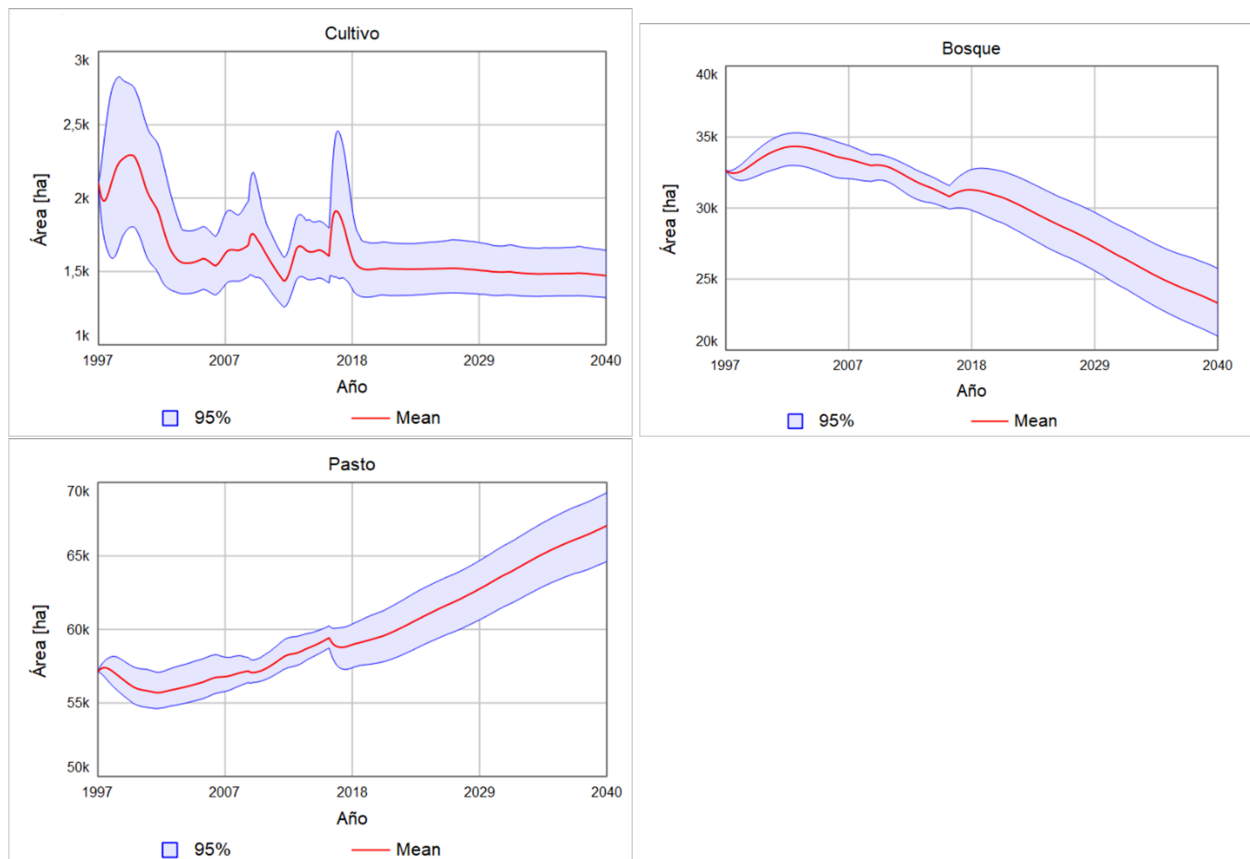
Tabla 4-1.: Prueba de condiciones extremas.

Parámetro	Valor extremo	Resultado
Valor inicial de bosque	100 % del área total de las coberturas	La cobertura de bosque domina durante los primeros 6 años de simulación. Su efecto es positivo sobre los servicios ecosistémicos.
Valor inicial de pasto	100 % del área total de las coberturas	La cobertura de pasto empieza con una muy amplia ventaja durante los primeros 10 años, la cual mantiene (aunque en menor medida) por el resto de la simulación. Su efecto es negativo sobre los servicios ecosistémicos.
Valor inicial de cultivo	100 % del área total de las coberturas	La cobertura de cultivo domina durante un año. Sin embargo, en ese breve tiempo, su efecto es muy negativo sobre los servicios ecosistémicos.

Fuente: elaboración propia

Para la validación de comportamiento se realizaron las siguientes pruebas:

1. **Análisis de sensibilidad:** se evaluó la sensibilidad del modelo frente a cambios en sus parámetros. En particular, se analizó el efecto de estos cambios sobre las coberturas y los servicios ecosistémicos. De los 35 parámetros evaluados, sólo 3 demostraron provocar una alta sensibilidad en todas las coberturas y en los servicios ecosistémicos (principalmente sobre el control de la erosión), a saber, tradición de ganadería, valor inicial de personas concientizadas ($P_C(0)$) y el tiempo de retardo de los procesos de educación (t_r). Estos parámetros están directamente relacionados con los criterios de tradición de bosques y pastos, los cuales tuvieron un gran peso en la estimación de la atractividad de cada cobertura, producto de la regresión logística multinomial de la Ecuación 4-5. Hubo otros parámetros con una sensibilidad media-alta, sólo que no frente a las variables de coberturas y servicios ecosistémicos directamente, sino frente a variables intermedias como la articulación entre actores o los ingresos económicos de las actividades productivas. Al descontar el efecto de estos parámetros, se observa una baja sensibilidad de las variables de cobertura frente a cambios en otros parámetros (ver Figura 4-2, la línea roja es la media de las corridas, la franja azul representa el intervalo de confianza de 95 %). De esta manera, vale la pena revisar si, para usos futuros del micromundo, la inclusión de estos parámetros es realmente necesaria, o si se pueden omitir sin problema y, de paso, simplificar aún más el modelo.

Figura 4-2.: Resultados del análisis de sensibilidad para las tres variables de cobertura.

Fuente: elaboración propia

- Replicación de datos históricos:** se verificó la capacidad del modelo para replicar el comportamiento observado de las variables de cobertura (Tabla 4-2). Los puntos de datos históricos se obtuvieron de las investigaciones de Machado et al. (2019) y Arango (2021), quienes, mediante el procesamiento de imágenes satelitales, calcularon las áreas de las coberturas en la cuenca para los años 1997, 2009, 2015 y 2019. La comparación entre los datos observados y los datos simulados arrojó para bosques un error de porcentaje medio absoluto (*MAPE*, en inglés) de 13.9%, para cultivos de 10.5% y para pastos de 3.6%. Dado que los valores del *MAPE* fueron menores al 25%, se concluye que el modelo replica los datos históricos con “precisión aceptable” (Swanson, 2015). Finalmente, vale la pena aclarar que el error asociado a la cobertura de bosques se debe a que la estimación de Machado et al. (2019) para el año 2015 fue atípicamente baja en comparación con los años restantes estimados por Arango (2021). Se plantea, pues, para futuras investigaciones, la necesidad de nuevos datos históricos de coberturas, que permitan validar con mayor confianza la capacidad del modelo para replicar dichos datos.

Tabla 4-2.: Comparación entre datos de coberturas simulados vs históricos.

	Año	Dato simulado [ha]	Dato observado [ha]	MAPE
Bosque	1997	32640.4	32640.4	13.9 %
	2009	32151.8	34803.2	
	2015	30957.7	21913.0	
	2019	31171.4	29246.3	
Cultivo	1997	2104.0	2104.0	10.5 %
	2009	1320.2	1526.1	
	2015	1353.2	1308.2	
	2019	1279.4	1711.6	
Pasto	1997	57097.8	57097.8	3.6 %
	2009	58370.3	55513.1	
	2015	59531.4	63966.0	
	2019	59391.5	60843.5	

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, los resultados de las pruebas de validación de estructura y comportamiento muestran que el modelo es robusto y confiable. Esta confiabilidad se manifiesta en la medida en que el modelo logra representar de manera precisa y coherente los fenómenos y dinámicas del sistema, incluso bajo diversas condiciones y supuestos.

4.3. Construyendo el entorno virtual

En esta etapa se definieron los *inputs* (o decisiones) y los *outputs* (o resultados) del micromundo. Por un lado, los resultados incluyeron todas aquellas variables que definían la sostenibilidad: control de la erosión, oferta de agua superficial, rentabilidades de las actividades económicas, aceptabilidad, nivel de confianza y concientización. También se mostró la variable de “Sostenibilidad” como tal, y las variables de cobertura, las cuales no definen directamente la sostenibilidad, pero son un elemento fundamental en toda la estructura del sistema.

Respecto a los *inputs*, a partir de los parámetros del modelo sobre los cuales se identificó que había gobernabilidad, se definió un abanico de 14 decisiones, que el usuario del micromundo puede tomar asumiendo el rol ficticio de “Gestor de cuenca sostenible”. Cada decisión parte de una configuración por defecto, que representa el escenario tendencial del sistema. A continuación, se describe cada una de las decisiones incluidas en el micromundo.

1. **Procesos de educación ambiental:** el usuario puede decidir si en la cuenca se implementan procesos de educación ambiental para la comunidad, como talleres, cursos, capacitaciones, etc. Esta es una decisión binaria que, al activarse, aumenta el valor del parámetro “Población alcanzada” (explicada en la Ec. 4-9) y, por ende, el nivel de concientización de la población.
2. **Efectividad de los procesos de educación:** esta decisión se puede tomar sólo si se implementó la decisión anterior. El usuario puede decidir si los procesos de educación ambiental incluyen estrategias pedagógicas que aumenten el involucramiento de las personas y que, por tanto, obtengan mayor aprendizaje.
3. **Inversión en proyectos comunitarios y apoyo a líderes ambientales:** se refiere al grado de apoyo por parte de las administraciones locales y de la autoridad ambiental a los proyectos comunitarios con enfoque ambiental y a los líderes ambientales. El efecto de esta decisión es sobre los parámetros “Participación de la comunidad” y “Liderazgo”.
4. **Disponibilidad de profesionales ambientales:** el usuario puede decidir la cantidad disponible y la permanencia de los profesionales encargados de hacer cumplir las normas ambientales en la cuenca. Un aumento en esta decisión implica un aumento en el parámetro “Eficiencia de la autoridad ambiental”.
5. **Programas de mejora continua de la autoridad ambiental:** es la disponibilidad de estrategias de mejora y su grado de implementación por parte de la autoridad ambiental. Al igual que la decisión anterior, su efecto es sobre el parámetro “Eficiencia de la autoridad ambiental”.
6. **Grado de rendición de cuentas de la autoridad ambiental:** es la frecuencia y divulgación de reportes de rendición de cuentas de la autoridad ambiental hacia la comunidad. Dado que en la cuenca de Río Grande la autoridad ambiental sufre de una baja credibilidad por parte de los habitantes (España-Guzmán, 2020), esta decisión incide directamente sobre el parámetro “Nivel de confianza”.
7. **Programas de acompañamiento para cumplir normatividad:** el usuario decide sobre la disponibilidad e implementación de programas de acompañamiento a la comunidad para el cumplimiento de las normas ambientales. Al igual que la decisión anterior, su efecto es sobre el parámetro “Nivel de confianza”.
8. **Espacios de concertación entre diseñadores de políticas:** hace alusión a la disponibilidad y frecuencia de espacios para el trabajo conjunto entre diseñadores de políticas ambientales y agropecuarias en la cuenca. Su efecto es sobre el parámetro “Articulación entre políticas”.

9. **Programas de fortalecimiento del Consejo de Cuenca:** se decide sobre la disponibilidad e implementación de programas que aumenten la representación de la comunidad en el Consejo de Cuenca⁹. Afecta el parámetro “Participación en la toma de decisiones”.
10. **Pago por Servicios Ambientales (PSA):** el usuario decide si se les paga a habitantes de la cuenca por conservar bosques dentro de sus predios. Esta decisión afecta el parámetro “Rentabilidad de la conservación”.
11. **Tipo de ganadería:** el usuario puede escoger si la ganadería que se realiza en la cuenca es tradicional, es decir, usa agroquímicos, razas de vacas foráneas, alimentación con complemento, entre otros, o es ganadería alternativa, es decir, usa abonos orgánicos, razas de vacas locales, alimentación alternativa y aplican sistemas silvopastoriles. Si se implementa ganadería alternativa, disminuye el parámetro “Productividad del ganado”, pero también disminuyen los costos por litro de leche producido y disminuye el factor de coberturas F_C en la Ec. 4-7, dado que el sistema silvopastoril combina pastos con bosques.
12. **Prácticas de manejo de cultivos:** el usuario puede decidir si implementa técnicas que reduzcan la pendiente de los suelos de cultivo. Esta decisión tiene efecto sobre el parámetro F_P de la Ec. 4-7.
13. **Importancia asignada al prestigio de ser agricultor:** es el grado de importancia que dan los agricultores al prestigio percibido por realizar su oficio. Afecta el parámetro “Tradición de agricultura” del módulo social.
14. **Importancia asignada al prestigio de ser ganadero:** es el grado de importancia que dan los ganaderos al prestigio percibido por realizar su oficio. Afecta el parámetro “Tradición de ganadería” del módulo social.

4.3.1. Interfaz gráfica

Teniendo claridad sobre las decisiones y los resultados del micromundo, procedimos a diseñar los elementos gráficos y funcionales del mismo. La interfaz se dividió en cuatro secciones, accesibles desde la página de inicio (Figura 4-3): “Introducción”, “Instrucciones” y “Realimentación”, que conforman el material de apoyo (explicado en la próxima sección); y “Simulador”, que contiene las decisiones y resultados.

⁹El Consejo de Cuenca es “la instancia consultiva y representativa de todos los actores que viven y desarrollan actividades dentro de la cuenca hidrográfica” (Decreto 1076 de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo de Colombia).

Figura 4-3.: Página de inicio del micromundo ORBEM.



Fuente: elaboración propia

Figura 4-4.: Primera ventana de resultados del micromundo.



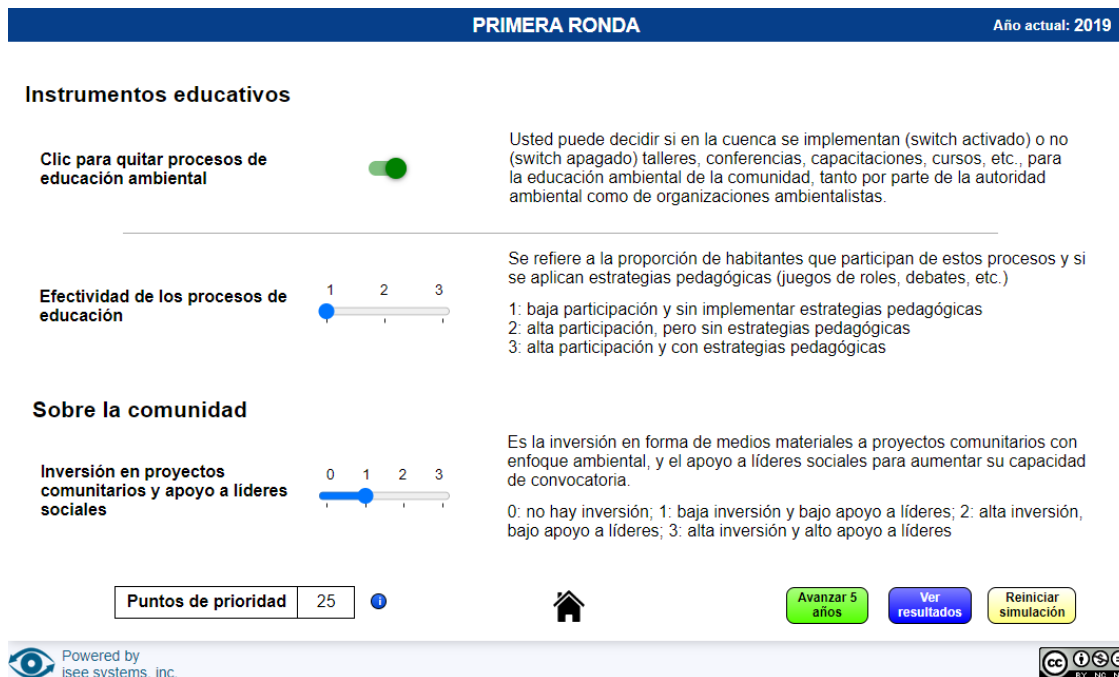
Fuente: elaboración propia

Al dar clic en la opción “Simulador”, se abre una primera ventana llamada “Estado actual de la cuenca”, donde se observan los indicadores de resultados para el año 2020, que es el año de partida del juego (Figura 4-4). Estos indicadores se visualizan mediante animaciones

SVG¹⁰, las cuales van cambiando (p. ej., aumentando de tamaño, apareciendo o desapareciendo, etc.) según las decisiones que tome el usuario, de manera que él/ella pueda observar el efecto de sus decisiones.

Pasando a la siguiente ventana, se encuentra el primer panel de decisiones del micromundo (Figura 4-5). En total, son cuatro paneles de decisiones, equivalentes a las cuatro rondas de juego. Al lado izquierdo se ubican las decisiones, al lado derecho la descripción de cada una y los posibles valores que puede tomar. Los mecanismos definidos para tomar las decisiones son: barras deslizables, que pueden tomar un valor entero dentro del intervalo definido; interruptores, que representan decisiones binarias; y cajas de texto, que se usa específicamente en la decisión de PSA, en la cual se introduce manualmente el valor deseado.

Figura 4-5.: Primera ventana de decisiones del micromundo.



Fuente: elaboración propia

También a la izquierda de esta ventana, en la parte inferior, se muestran los “Puntos de prioridad”, que representan el presupuesto con el que cuenta el jugador para tomar sus decisiones. De esta manera, activar o aumentar una decisión gasta puntos, mientras que desactivarla o disminuirla permite recuperar puntos. El propósito de estos puntos es representar el hecho de que, en un sistema real, las decisiones cuestan tiempo, dinero, esfuerzo, y que, por tanto,

¹⁰Los archivos gráficos vectoriales escalables (SVG, por sus siglas en inglés) son un formato gráfico especial al que se puede hacer cambios en posición, tamaño, rotación y color. Stella Architech cuenta con opciones para manipular estos archivos y conectarlos con variables del modelo.

las personas deben ser estratégicas y distribuir inteligentemente su presupuesto.

Una vez el usuario ha seleccionado los valores deseados, debe dar clic en el botón “Avanzar 5 años” para que corra la simulación y, posteriormente, dar clic en “Ver resultados” para pasar nuevamente al panel de resultados, donde podrá observar los efectos de sus decisiones sobre los indicadores expuestos más arriba. El juego acaba cuando se tomen las decisiones en la cuarta ronda y se llegue al año 2040, que es el último año de la simulación.

4.3.2. Material de apoyo

Dado que ORBEM se concibió como una herramienta a disposición de todo tipo de audiencias, el material de apoyo se diseñó usando un lenguaje accesible y didáctico. Así, como parte del *briefing*, tenemos las secciones de “Introducción” e “Instrucciones”. Para la introducción, se hicieron tres videos animados usando una herramienta de edición en línea llamada Powtoon. Cada video dura alrededor de un minuto y explica de forma muy visual y en términos sencillos los conceptos clave del juego, a saber, sistema socio-ecológico, cuenca hidrográfica y sostenibilidad. Adicionalmente, se hizo un *brochure* a manera de guía o manual, en el que se explica de manera detallada el contexto del juego, objetivo, instrucciones, restricciones, resultados y decisiones (para más detalle, ver Anexo C).

Por otro lado, el *debriefing* consiste en un espacio de discusión con los participantes al final del juego, donde cada uno expresa su percepción frente a los resultados de este. En particular, se propone que la discusión gire en torno a cuatro preguntas clave:

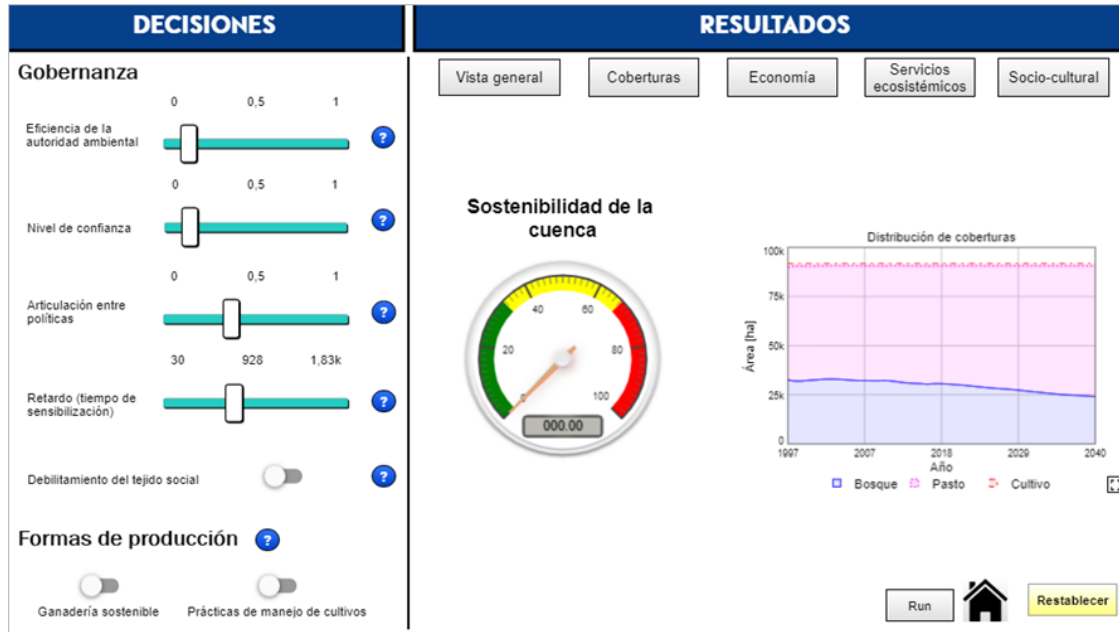
- ¿Por qué cree que se obtuvieron los resultados que se obtuvieron?
- ¿Qué decisiones se alegra de haber tomado?
- ¿Qué decisiones se arrepiente de haber tomado?
- ¿Esperaba que las decisiones tuvieran los efectos observados?

Posterior a la discusión, el moderador del juego hace una breve presentación donde explica la estructura del modelo y las causas del comportamiento del micromundo, revelando a los jugadores el significado de cada decisión dentro del modelo.

4.3.3. Iteración

Antes de llegar a su versión final, el micromundo pasó por varias revisiones del grupo de trabajo. En la Figura 4-6 se observa una de las primeras versiones de la interfaz. Los principales cambios que sufrió el micromundo durante esta fase fueron los siguientes:

Figura 4-6.: Primera versión de la interfaz del micromundo.



Fuente: elaboración propia

- En lugar de simplemente poner el nombre de los parámetros en el panel de decisiones, las decisiones se redactaron como estrategias o acciones concretas que podrían tomar actores en el sistema real, y que son las que, de hecho, modifican los parámetros del modelo.
- Inicialmente, la sección de resultados consistía únicamente en gráficos y tablas. No obstante, esta forma de visualización no era tan intuitiva ni tampoco adecuada para personas sin un entrenamiento matemático básico. Como la accesibilidad es uno de los pilares del micromundo, se optó por usar animaciones sencillas que representaran de forma intuitiva cada una de las variables de salida.
- El panel de resultados se dividía en cinco secciones, a las cuales se podía acceder mediante los botones en la parte superior. Sin embargo, a la hora de usar el simulador, muchas personas no se molestaban en mirar estas secciones y permanecían sólo en la ventana de “Vista general”. Por esta razón, se quitaron las cinco secciones y se dejó una única ventana de resultados con toda la información necesaria para el jugador.

En general, los resultados de la iteración hicieron que la experiencia de juego fuese lo más sencilla e intuitiva posible, logrando conservar el equilibrio entre simplicidad y rigurosidad.

4.3.4. Pruebas piloto

Se realizaron dos pruebas alfa y una prueba beta. Las primeras se llevaron a cabo los días 28 de febrero y 8 de mayo de 2023, con el grupo de investigación “Ciencias de la Decisión” de la Facultad de Minas (Figura 4-7), el cual está conformado por egresados, estudiantes de maestría, doctorado y profesores, con experiencia en varios campos, incluyendo sistemas socio-ecológicos, modelación y micromundos. En ambos talleres participaron 12 personas. La prueba beta tuvo lugar en la asignatura de posgrado “Sistemas socio-ecológicos” con un grupo de cinco estudiantes de especialización en gestión ambiental y maestría en medio ambiente y desarrollo.

Figura 4-7.: Registro fotográfico de la primera prueba alfa del micromundo.



Fuente: elaboración propia

Tanto en las pruebas alfa como en las pruebas beta, se aplicó el *briefing*, *debriefing* y la sesión de juego como tal. Las recomendaciones más significativas de las pruebas piloto se tuvieron en cuenta para seguir mejorando el micromundo antes de ponerlo en funcionamiento con el público objetivo. Las principales sugerencias de estos espacios fueron las siguientes:

- Había que definir mejor las decisiones, expresarlas como acciones o estrategias más claras.
- Era necesario dejar explícito desde el principio cuál era el objetivo del juego.

- El formato de registro de decisiones y resultados no fue adecuado, se consideró muy largo y tedioso de diligenciar.
- Algunos elementos de la interfaz generaban confusión y aportaban poco a la experiencia de juego.
- El paso de tiempo de la simulación debía ser más largo o, en todo caso, debía brindarse al usuario varias opciones de paso de tiempo.
- Explorar la opción de que la dinámica de juego fuese grupal, en lugar de que fuese autónoma.

5. Aprendiendo sobre sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos con ORBEM

Este capítulo presenta el análisis y resultados de la aplicación del micromundo para estudiar el efecto que tienen las características individuales de las personas sobre su aprendizaje sobre sostenibilidad. El capítulo se divide en cuatro secciones: en la Sección 5.1, se comparan los resultados de aprendizaje antes y después de la sesión de juego con el instrumento seleccionado para esta medición. En la Sección 5.2, se muestra la estadística descriptiva de las características de los actores. En la Sección 5.3, se evalúa si dichas características tuvieron algún efecto significativo sobre su aprendizaje. Finalmente, en la Sección 5.4, se presentan algunos comentarios y sugerencias de los participantes luego de la sesión de juego. La computación de todos los datos se llevó a cabo en Microsoft Excel y RStudio.

Para la recolección de datos, se realizaron seis talleres con una muestra del público objetivo conformada por 50 personas ($N = 50$). Según se observa en la Tabla 5-1, la muestra incluyó participantes de todos los sectores definidos para el público objetivo en el Capítulo 4.1, con excepción de los gremios de productores, quienes no atendieron las invitaciones a participar en los talleres.

Tabla 5-1.: Talleres realizados con la muestra del público objetivo.

Fecha	Tipo de actor	N° de participantes
1°/junio	Comunidad	4
6/junio	Subsecretaría de Ambiente	7
8/junio	Estudiantes de grado 11	18
23/junio	Comunidad y empresa de servicios públicos	3
27/junio	Academia y autoridad ambiental (Corantioquia)	7
29/junio	Autoridad ambiental (Cornare), comunidad, administración municipal, profesores, empresa de servicios públicos	11

Fuente: elaboración propia

Cada taller se desarrolló siguiendo el orden establecido en la Tabla 5-2. Como se explicó en la Sección 3.3, los talleres consistieron en juegos de roles grupales, en los que los participantes asumían el papel de “comité de gestores de cuenca sostenible”, y debían tomar decisiones (con ayuda del micromundo) que condujeran una cuenca ficticia a un estado de sostenibilidad.

Tabla 5-2.: Protocolo de las sesiones con el micromundo.

Duración [min]	Actividad
10–15	Presentación a cargo del moderador sobre el propósito de la sesión y los conceptos básicos
10–15	Repartición del plegable o <i>brochure</i> (Anexo C) y lectura grupal de las instrucciones del juego
15	Aplicación del primer cuestionario
35–40	Juego con el micromundo
15	Aplicación del segundo cuestionario
10–15	<i>Debriefing</i> (discusión y explicación de los resultados)
5	Cierre del taller, agradecimientos y repartición de refrigerios
Total	
100–120	

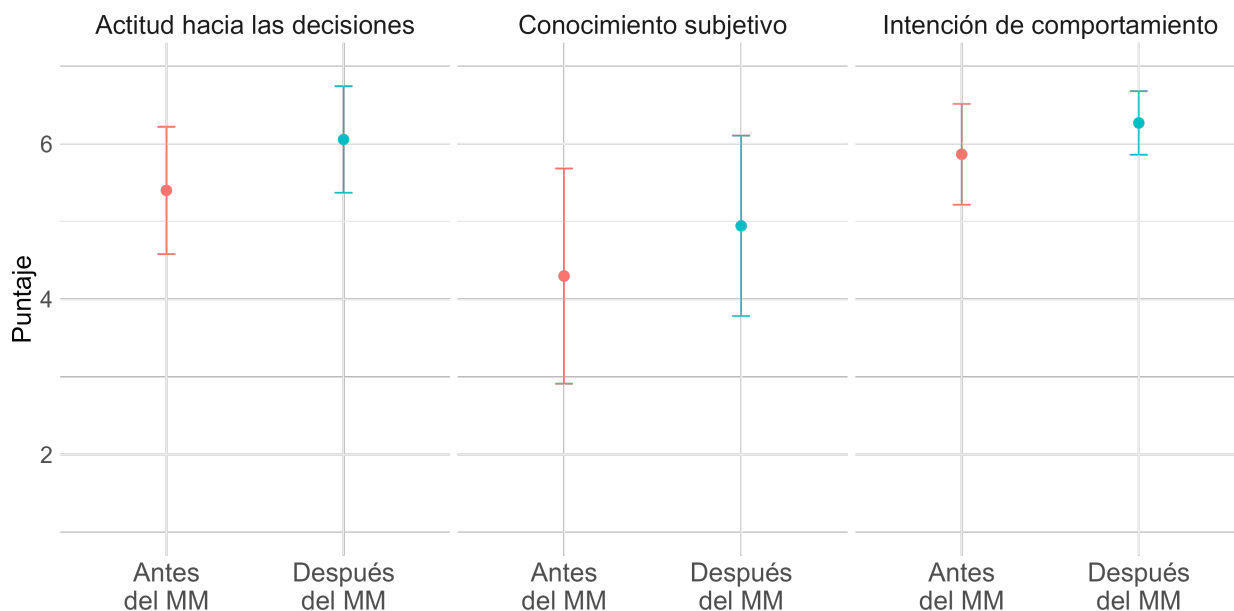
Fuente: elaboración propia

5.1. Medición del aprendizaje

Según se expuso en el capítulo de Metodología, el aprendizaje se divide en tres componentes (Stouten et al., 2012): (i) conocimiento subjetivo, (ii) actitud hacia las decisiones, y (iii) intención de comportamiento. Para medir el aprendizaje de las personas antes y después de usar el micromundo, fue necesario cuantificar cada componente a través de cuestionarios (como se discutió en la Sección 3.2). Las preguntas dentro de los cuestionarios se agruparon según el componente analizado: para el conocimiento subjetivo se definieron cuatro preguntas o ítems, para la actitud hacia las decisiones se definieron siete ítems, y para la intención de comportamiento se definieron doce ítems (para ver los cuestionarios completos, remitirse al Anexo E). El usuario calificaba cada ítem en una escala ordinal entre 1 y 7, donde 1 representaba el menor grado de aprobación del ítem (p. ej., “Totalmente en desacuerdo”) y 7 el mayor grado de aprobación (p. ej., “Totalmente de acuerdo”). El promedio entre los ítems de un mismo componente era igual al puntaje de ese componente.

Así, para la muestra del público objetivo, se obtuvo un puntaje medio por componente de aprendizaje según el momento del taller (antes y después del micromundo, ver Figura 5-1).

Figura 5-1.: Comparación de los puntajes por componente de aprendizaje, antes y después de usar el micromundo (media, desviación estándar).



Fuente: elaboración propia

Para verificar que los datos siguieran una distribución normal, se llevaron a cabo pruebas de Shapiro-Wilk en RStudio (ver Tabla 5-3). Esta prueba estadística plantea como hipótesis nula que los datos se distribuyen de forma normal. Por lo tanto, dado que en los tres casos $p > .05$, no fue posible rechazar la hipótesis nula y se asumió una distribución normal de los datos.

Tabla 5-3.: Resultados de la prueba Shapiro-Wilk.

Componente de aprendizaje	W	Valor p
Conocimiento subjetivo	.973	.304
Actitud hacia las decisiones	.972	.268
Intención de comportamiento	.977	.454

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, para evaluar si el uso del micromundo provocó un aumento significativo en el aprendizaje de los participantes, se realizaron pruebas t de Student apareadas, donde las hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_a) se definieron como sigue (Frost, 2023a; Hsu & Lachenbruch, 2014):

H_0 : no hay diferencia entre el puntaje medio antes de usar el micromundo y el puntaje medio

después de usar el micromundo.

H_a : el puntaje medio después de usar el micromundo es mayor que el puntaje medio antes de usar el micromundo.

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas::

- Los puntajes de **conocimiento subjetivo** antes ($M = 4.30$, $DE = 1.38$) y después ($M = 4.95$, $DE = 1.16$) de usar el micromundo, indican que la herramienta generó un **aumento significativo en este componente del aprendizaje**, $t(49) = -4.3$, $p < .001$. Por tanto, no se encontró evidencia que soporte la hipótesis nula.
- Los puntajes de **actitud hacia las decisiones** antes ($M = 5.40$, $DE = 0.82$) y después ($M = 6.06$, $DE = 0.69$) de usar el micromundo, indican que la herramienta generó un **aumento significativo en este componente del aprendizaje**, $t(49) = -6.3$, $p < .001$. Por tanto, no se encontró evidencia que soporte la hipótesis nula.
- Finalmente, los puntajes de **intención de comportamiento** antes ($M = 5.87$, $DE = 0.65$) y después ($M = 6.27$, $DE = 0.41$) de usar el micromundo, indican que la herramienta generó un **aumento significativo en este componente del aprendizaje**, $t(49) = -4.6$, $p < .001$. Por tanto, no se encontró evidencia que soporte la hipótesis nula.

Los resultados indican que, gracias al micromundo, se produjo un incremento en el conocimiento percibido de las personas sobre el efecto de distintas decisiones en la sostenibilidad de un SSE. Adicionalmente, luego de participar en el taller con el micromundo, aumentó tanto la opinión favorable como la motivación de las personas respecto a aquellas decisiones que llevan un SSE a la sostenibilidad.

Dichos resultados muestran el potencial de ORBEM para incidir positivamente en el aprendizaje y en la toma de decisiones sostenibles de los actores, y permiten concluir que, en efecto, el micromundo es una herramienta eficaz para la generación de aprendizaje. No obstante, queda la puerta abierta para futuras investigaciones que analicen si otras herramientas o metodologías pedagógicas también pueden generar un aprendizaje significativo. Este aspecto se aborda con mayor profundidad en el último capítulo.

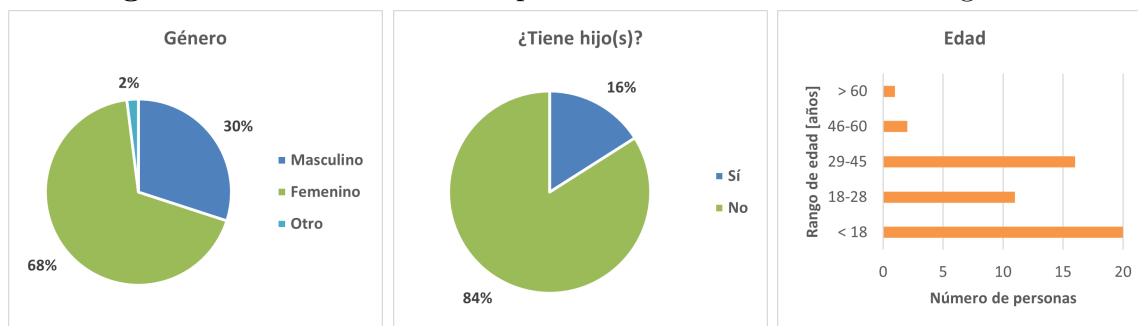
5.2. Caracterización de los actores

En esta sección se presenta la estadística descriptiva de las características de los actores, agrupadas según las siguientes categorías: demografía, educación y formación, contexto socioeconómico, ubicación geográfica, y preferencias personales. Como se detalló en la Sección 3.3, la convocatoria de actores se realizó con ayuda de la Subsecretaría de Ambiente de La

Ceja. Algunas invitaciones se hicieron de forma presencial, es decir, se habló personalmente con los actores en un espacio previamente concertado. En este espacio se les presentaba el propósito del juego y se les invitaba a participar en los talleres, definiendo la fecha, hora y lugar según su conveniencia. Cuando no fue posible hacer la invitación presencial, se contactó a los actores por vía telefónica, WhatsApp o correo electrónico. En total, se contactaron alrededor de 100 personas, de las cuales asistieron 50. Las limitaciones relacionadas con el proceso de convocatoria y la muestra del público objetivo se abordan con mayor profundidad en el último capítulo de la tesis.

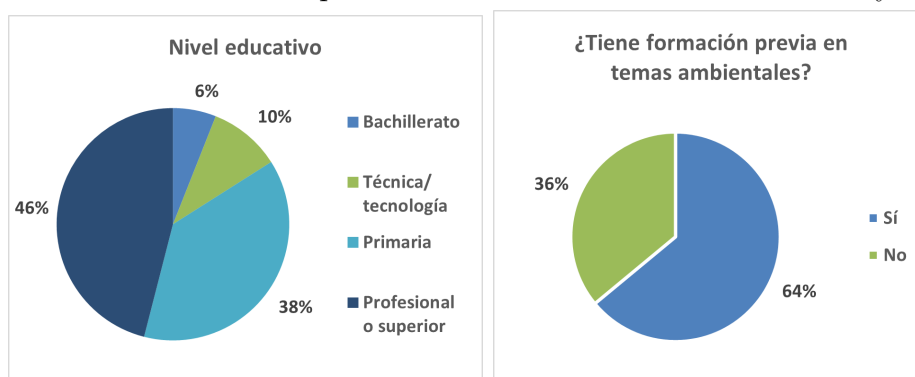
Sobre las características demográficas (Figura 5-2), vale la pena destacar la participación mayoritaria de jóvenes y mujeres en los talleres. Este tipo de público fue quien mostró mayor interés y disponibilidad para asistir a las sesiones de juego, a pesar de que la convocatoria se hizo de manera uniforme para todos los grupos del público objetivo. Por otro lado, sólo un porcentaje reducido (16 %) de las personas eran padres.

Figura 5-2.: Estadística descriptiva de las características demográficas.



Fuente: elaboración propia

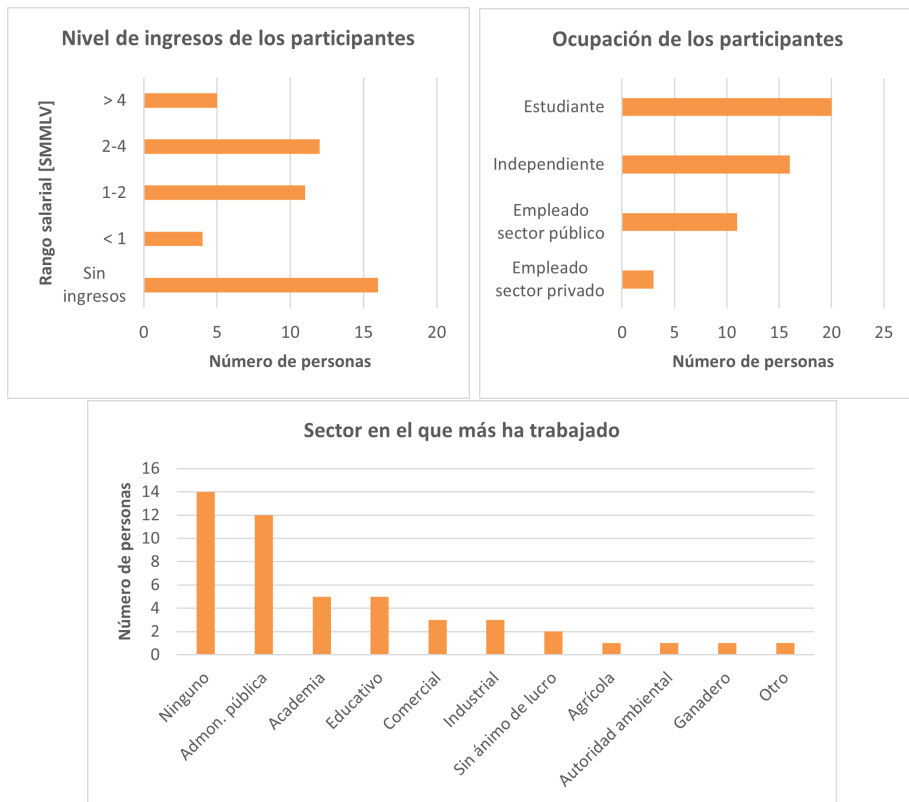
Figura 5-3.: Estadística descriptiva de las características de educación y formación.



Fuente: elaboración propia

En cuanto a las características de educación y formación (Figura 5-3), el 46 % de los participantes tenían un título profesional o superior, los cuales se desempeñaban principalmente en los sectores académico, de la administración municipal y la autoridad ambiental. La educación primaria fue el siguiente nivel educativo en la lista, atribuible a los estudiantes de grado 11 que participaron en los talleres. Por otro lado, con una menor frecuencia, aparecieron las personas con formación técnica o tecnológica (10 %) y bachilleres (6 %). Finalmente, casi dos tercios de los participantes tenían una formación previa en temas ambientales, tanto formal (por ejemplo, una carrera universitaria en ciencias ambientales) como informal (p. ej., cursos cortos sobre sostenibilidad), lo cual es un resultado esperado, ya que son personas con una mayor predisposición a participar en espacios como el taller del micromundo.

Figura 5-4.: Estadística descriptiva de las características de contexto socioeconómico.

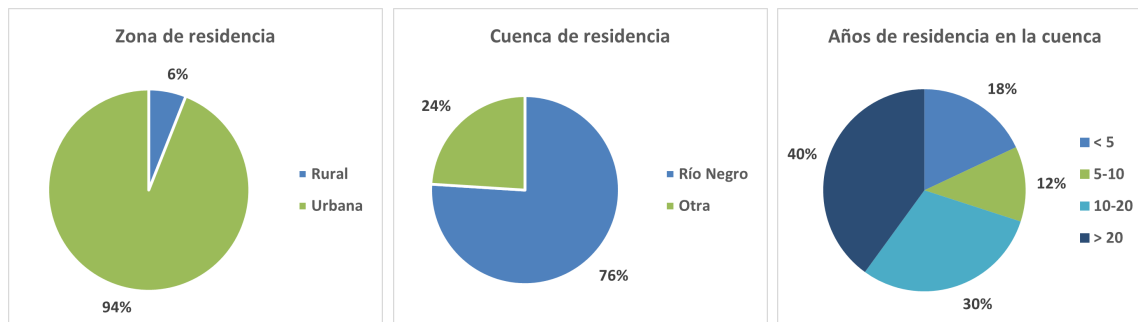


Fuente: elaboración propia

Los valores más frecuentes en las características de contexto socioeconómico (Figura 5-4) corresponden a los estudiantes, dado que fueron el público dominante en toda la muestra. El 80 % de los estudiantes se dedicaban exclusivamente a sus actividades académicas y, por tanto, no percibían ingresos ni habían desempeñado actividades productivas en ningún sector. Siguiendo en frecuencia, aparecen los trabajadores independientes (en su mayoría contratistas) y empleados del sector público, muchos de los cuales desempeñan sus labores en oficinas de la administración municipal, pero también en otros sectores como el académico

y el educativo. Finalmente, luego de descontar a los estudiantes, los niveles de ingresos de los actores fueron en su mayoría medios y medio-altos.

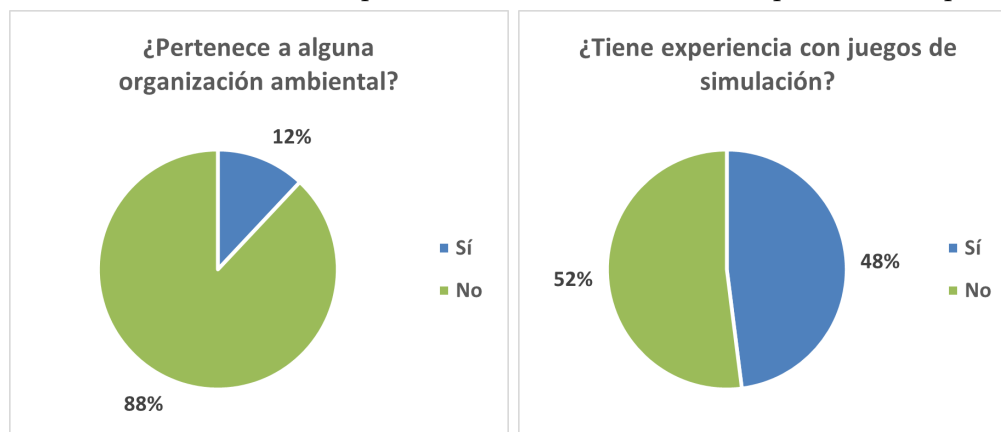
Figura 5-5.: Estadística descriptiva de las características de ubicación geográfica.



Fuente: elaboración propia

Las características de ubicación geográfica (Figura 5-5) mostraron una población esencialmente urbana (94%). Esto se debe, en gran medida, a que los actores del sector productivo no se vincularon a los talleres realizados. El resultado también es coherente con los procesos migratorios desde zonas rurales hacia centros urbanos, muy característicos en municipios que han experimentado un acelerado crecimiento económico como La Ceja (CORNARE, 2016). Finalmente, más de tres cuartos de los participantes reside en la cuenca del Río Negro, en particular, en la unidad territorial conformada por El Retiro, La Ceja y Envigado. El 70% de los participantes han vivido en dicha cuenca durante diez o más años.

Figura 5-6.: Estadística descriptiva de las características de preferencias personales.



Fuente: elaboración propia

La última categoría de características alude a las preferencias personales de los actores (Figura 5-6). En primera instancia, sólo un 12% de los participantes pertenecía a organizaciones ambientales como ONGs, grupos activistas, etc. Este porcentaje contrasta con el de personas

con formación previa en temas ambientales, sin embargo no es del todo inesperado, ya que algunos estudios han encontrado que “el conocimiento ambiental obtenido a través de la educación formal (...) no necesariamente contribuye a un mayor involucramiento en conductas ambientales de impacto directo” (Janmaimool & Khajohnmanee, 2019). En segundo lugar, fue bastante equitativa la distribución entre quienes tenían experiencia con juegos de simulación y quienes no, siendo más frecuente la respuesta positiva en los más jóvenes (menores de 28 años).

5.3. Efecto de las características de los actores sobre su aprendizaje

Luego de analizar la estadística descriptiva de la muestra poblacional, se realizaron análisis de varianza 2×2 , es decir, con dos factores o variables independientes: una variable dentro de sujetos y otra variable entre sujetos. En todos los casos, el factor dentro de sujetos fue el momento del taller (antes y después del micromundo), mientras que el factor entre sujetos iba variando según la característica que se analizaba. Al ser 13 características en total, se realizaron 13 ANOVAs diferentes por componente de aprendizaje.

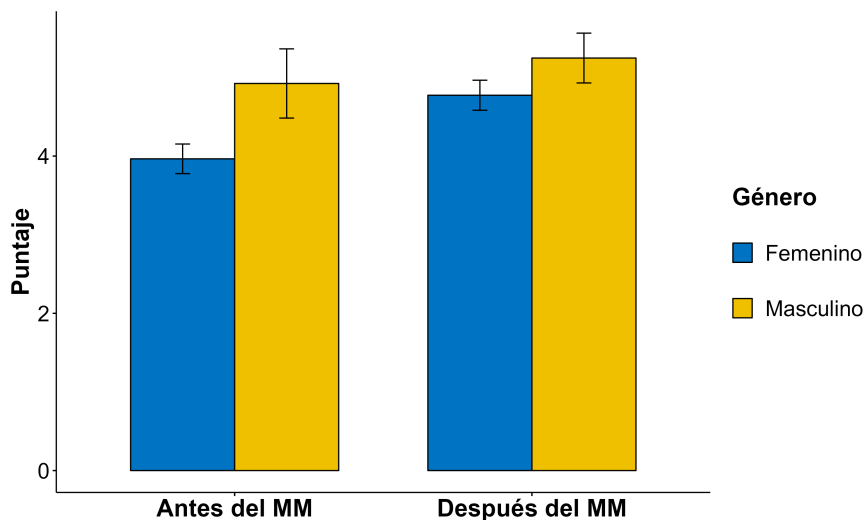
A continuación, se presentan los resultados estadísticamente significativos ($p < .05$) por componente de aprendizaje, es decir, aquellos resultados en los que se evidenció un cambio significativo en los puntajes por efecto de las características de los actores. Adicionalmente, se reportan los resultados de pruebas *post-hoc*, las cuales permiten matizar los resultados de cada ANOVA al “explorar las diferencias medias entre los grupos [de una variable independiente]” (Frost, 2023b). Para ver los resultados completos de las pruebas, remitirse al Anexo D.

5.3.1. Conocimiento subjetivo

- Hubo un efecto principal¹ significativo del género, $F(1.47) = 4.33$, $p = .043$, $\eta^2 = .084$, siendo los hombres quienes obtuvieron un puntaje medio mayor que las mujeres en ambos momentos del taller (Figura 5-7). El resultado es consistente con algunos estudios que reportan el efecto “arrogancia masculina, humildad femenina”, según el cual los hombres, en promedio, tienen una mayor estimación o percepción de sus propios conocimientos en comparación con las mujeres (Reilly et al., 2022).

¹El ANOVA de diseño mixto permite “(i) analizar el *efecto principal*, es decir, el efecto de una única variable independiente, promediado a través de los niveles de la otra variable independiente; y (ii) probar si hay una *interacción* entre dos variables independientes. Una interacción está presente cuando el efecto de una variable independiente es más fuerte sobre un nivel de la otra variable independiente que sobre el segundo nivel de esa misma variable independiente” (Murrar & Brauer, 2018, p. 3).

Figura 5-7.: Conocimiento subjetivo según género del participante y momento del taller (media, error estándar).



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, el análisis *post-hoc* mostró que, antes de usar el micromundo, la diferencia entre géneros fue significativa ($M = -.959$, $SE = .406$, $p = .022$). Sin embargo, luego de usar el micromundo, dicha diferencia dejó de ser significativa ($M = -.473$, $SE = .356$, $p = .190$). Así, los resultados sugieren que el uso del micromundo permitió cerrar las brechas entre hombre y mujeres.

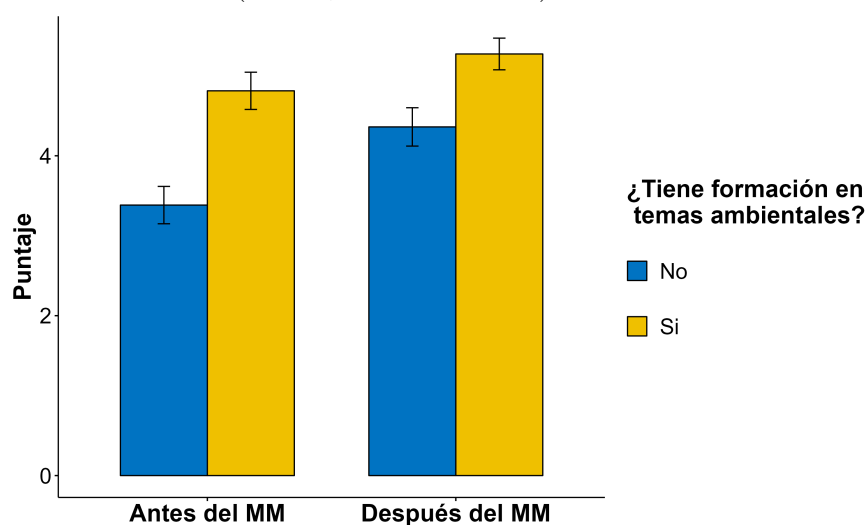
Este hallazgo es muy importante, ya que algunos estudios sugieren que el rol de las mujeres es fundamental en los procesos de gestión ambiental y sostenibilidad en los territorios (Asteria & Herdiansyah, 2020; Barrero-Amórtegui & Maldonado, 2021). Por lo tanto, el micromundo se presenta como una potencial forma de apoyar procesos pedagógicos más igualitarios y de orientar los esfuerzos, en términos formativos, hacia el público femenino en contextos más tradicionales.

- Hubo un efecto principal significativo de la formación previa en temas ambientales sobre el puntaje de conocimiento subjetivo, $F(1.48) = 15.12$, $p < .001$, $\eta^2 = .240$. El ANOVA mostró que las personas con formación (formal o informal) en temas ambientales obtuvieron, en promedio, un mayor puntaje que quienes no tenían dicha formación (Figura 5-8). No obstante, también vale la pena resaltar que quienes no tenían formación previa aumentaron significativamente su aprendizaje después de usar el micromundo, lo cual es concordante con los resultados de la Sección 5.1.

El análisis *post-hoc* mostró que la diferencia media entre quienes tenían formación am-

biental y quienes no, fue significativa antes de usar el micromundo ($M = -1.429$, $SE = .357$, $p < .001$) y después de usar el micromundo ($M = -.912$, $SE = .320$, $p = .006$). Los resultados destacan la importancia de seguir fomentando los procesos formativos, tanto formales como informales, en temas ambientales. Al fin y al cabo, los micromundos son sólo un complemento para el aprendizaje de SSE. Como advirtieron Warren & Langley (1999), “los micromundos parecen ser efectivos sólo cuando involucran a las personas en una conversación reflexiva sobre la situación. (...) [E]l juego debe estar embebido en un entorno de aprendizaje estructurado”. Por esta razón, más que pensar en los micromundos como un elemento imprescindible para la comprensión de SSE, hay que verlos como catalizadores de otros procesos formativos igualmente valiosos.

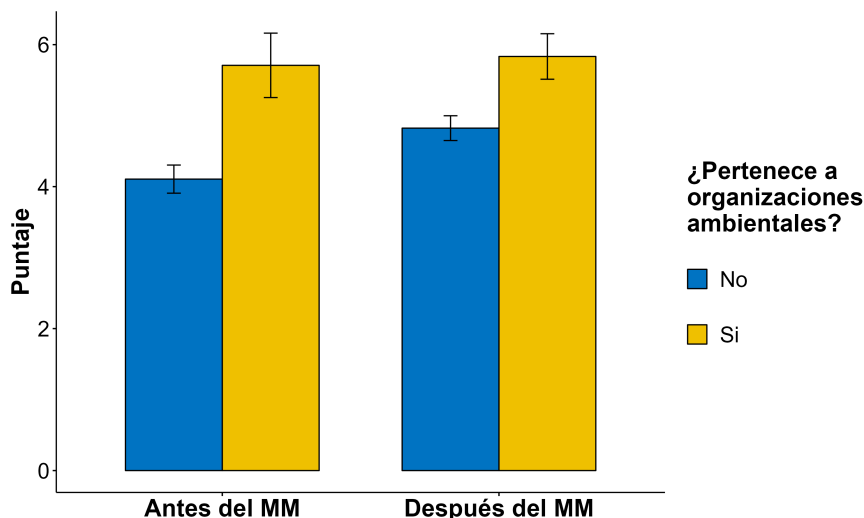
Figura 5-8.: Conocimiento subjetivo según formación previa en temas ambientales y momento del taller (media, error estándar).



Fuente: elaboración propia

- Hubo un efecto principal significativo de la pertenencia a organizaciones ambientales sobre el puntaje de conocimiento subjetivo, $F(1.48) = 7.60$, $p = .008$, $\eta^2 = .137$. Las personas afiliadas a estas organizaciones obtuvieron mayores puntajes en ambos momentos del taller (Figura 5-9). El análisis *post-hoc* mostró que la diferencia media entre quienes pertenecían a organizaciones ambientales y quienes no, fue significativa antes de usar el micromundo ($M = -1.60$, $SE = .563$, $p = .006$) y después de usar el micromundo ($M = -1.01$, $SE = .490$, $p = .045$). Los resultados sugieren que el involucramiento con estas organizaciones aumenta la afinidad y sensibilidad de las personas a los temas que trata el micromundo, lo cual los lleva a tener una mayor percepción de sus conocimientos en relación con el efecto de las decisiones sobre la sostenibilidad de un SSE.

Figura 5-9.: Conocimiento subjetivo según pertenencia a organizaciones ambientales y momento del taller (media, error estándar).



Fuente: elaboración propia

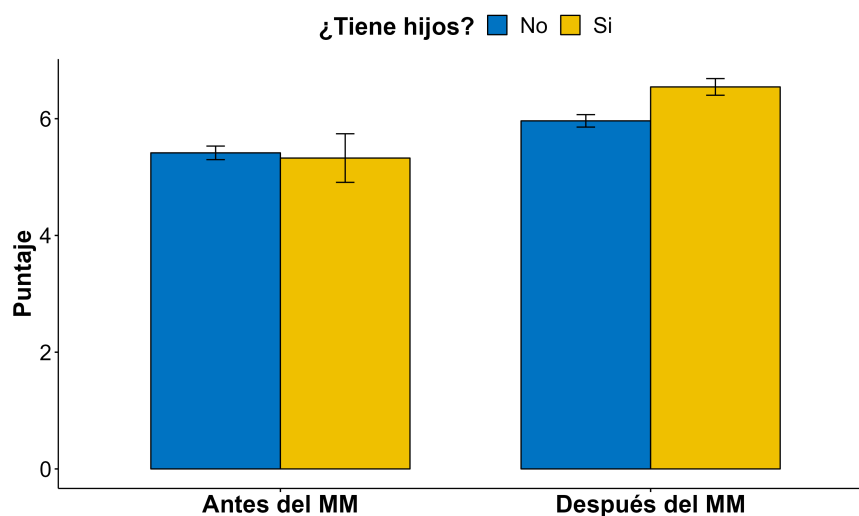
Respecto a las siguientes características, no se encontraron efectos principales significativos sobre el puntaje de conocimiento subjetivo: ocupación, estructura familiar, edad, nivel educativo, sector en que más ha trabajado, ingresos mensuales, zona rural/urbana, cuenca de residencia, tiempo de residencia, y familiaridad con juegos de simulación. Tampoco se encontraron interacciones significativas entre las características y el uso del micromundo.

5.3.2. Actitud hacia las decisiones

- Hubo una interacción significativa entre la estructura familiar y el uso del micromundo, $F(1.48) = 6.19$, $p = .016$, $\eta^2 = .114$. En particular, las personas con hijos experimentaron un mayor aumento en su puntaje luego de usar el micromundo (Figura 5-10). El análisis *post-hoc* indicó que, antes de usar la herramienta, no hubo diferencia significativa entre los puntajes de quienes tenían hijos y quienes no ($M = .089$, $SE = .320$, $p = .782$). Luego de usar el micromundo, ambos grupos tuvieron un aumento en sus puntajes, sin embargo, el efecto fue significativamente mayor para los padres ($M = -.581$, $SE = .254$, $p = .026$). El resultado apoya la hipótesis de que los padres tienen un mayor incentivo para cambiar su actitud respecto a las decisiones que puedan asegurar un futuro más sostenible para sus hijos.

Sin embargo, algunas investigaciones han concluido lo contrario. Por ejemplo, Nordström et al. (2020) mostraron que los hogares con hijos en Suecia emitían más CO₂ que los hogares sin hijos, lo cual atribuyen al hecho de que las prioridades de las personas cambian cuando se convierten en padres, y que sus preocupaciones tienden a redirec-

Figura 5-10.: Actitud hacia las decisiones según estructura familiar y momento del taller (media, error estándar).



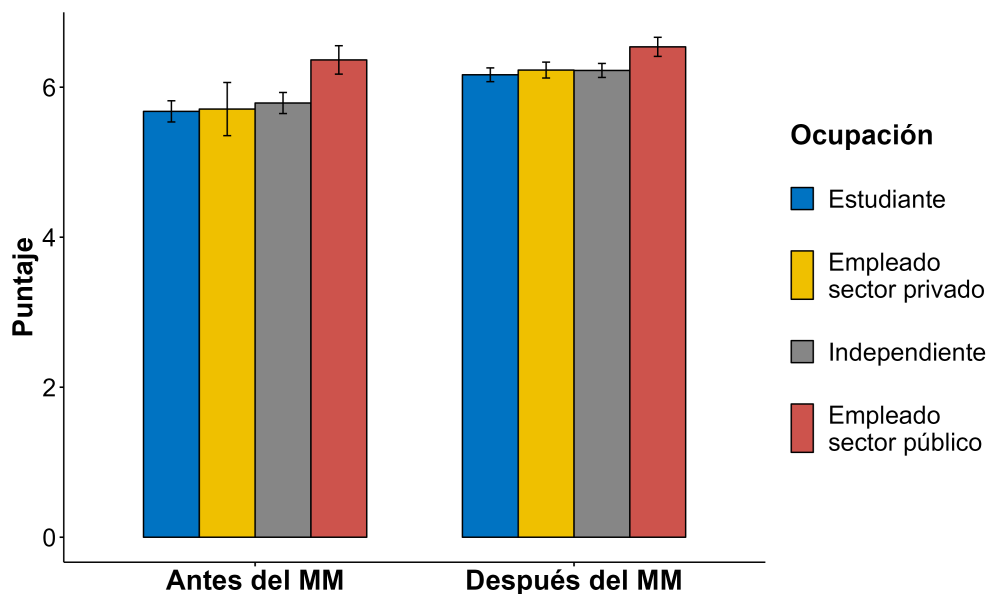
Fuente: elaboración propia

cionarse hacia asuntos más inmediatos y cotidianos. En la misma línea, Thomas et al. (2018) pusieron a prueba la “hipótesis del legado”, según la cual “tener hijos lleva a los padres a considerar el legado dejado a sus hijos respecto a la calidad ambiental” (Thomas et al., 2018). Sus resultados mostraron que, de hecho, quienes tenían nuevos hijos disminuían sus actitudes ambientales, con excepción de aquellos padres que ya tenían una preocupación ambiental previa. Por lo tanto, se requieren más estudios para concluir con mayor grado de certeza si esta característica realmente tiene un efecto positivo sobre la actitud de las personas hacia las decisiones sostenibles.

Respecto a las siguientes características, no se encontraron efectos principales significativos sobre el puntaje de actitud hacia las decisiones: género, edad, ocupación, nivel educativo, formación en temas ambientales, sector en que más ha trabajado, ingresos mensuales, zona rural/urbana, cuenca de residencia, tiempo de residencia, pertenencia a organizaciones ambientales, y familiaridad con juegos de simulación. Con excepción de la estructura familiar, no hubo interacciones significativas entre las características y el uso del micromundo.

5.3.3. Intención de comportamiento

- Hubo un efecto principal significativo de la ocupación sobre el puntaje de intención de comportamiento, $F(3.46) = 4.37$, $p = .009$, $\eta^2 = .222$, siendo los empleados del sector público quienes obtuvieron los mayores puntajes en relación con los demás grupos (Figura 5-11).

Figura 5-11.: Intención de comportamiento según ocupación y momento del taller.

Fuente: elaboración propia

Una posible explicación del resultado es que, por definición, estos empleados son servidores públicos, es decir, están al servicio del Estado y de la comunidad². Por tanto, puede haber una mayor presión social o expectativas para tomar decisiones en el mundo real que estén encaminadas hacia la sostenibilidad. También es posible que estos actores tengan un conocimiento más profundo de las políticas y regulaciones gubernamentales en torno a la sostenibilidad, o que, por los mismos lineamientos y estatutos de sus cargos, tengan un mayor apremio por promover la sostenibilidad en comparación con sus contrapartes de otras ocupaciones.

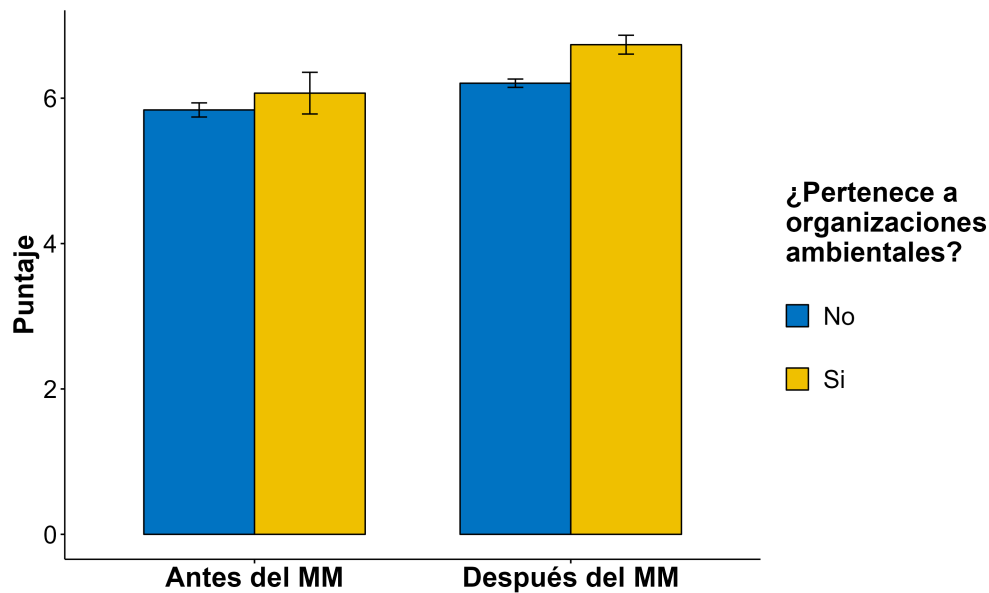
El análisis *post-hoc* mostró una diferencia significativa entre estudiantes y empleados del sector público antes de usar el micromundo ($M = -.686$, $SE = .228$, $p = .022$). Después de usar el micromundo, dicha diferencia dejó de ser significativa ($M = -.372$, $SE = .148$, $p = .070$). Por consiguiente, se evidenció un cierre de brechas importante entre estudiantes y empleados del sector público. Esto muestra el gran potencial del micromundo como herramienta pedagógica que estimula la toma de decisiones sostenibles en los más jóvenes.

- Hubo un efecto principal significativo de la pertenencia a organizaciones ambientales sobre el puntaje de intención de comportamiento, $F(1.48) = 4.15$, $p = .047$, $\eta^2 = .080$ (Figura 5-12). De esta manera, la pertenencia a organizaciones ambientales es la única característica con un efecto principal significativo en más de un componente del

²Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 123. 7 de julio de 1991 (Colombia).

aprendizaje (i.e., conocimiento subjetivo e intención de comportamiento).

Figura 5-12.: Intención de comportamiento según pertenencia a organizaciones ambientales y momento del taller (media, error estándar).



Fuente: elaboración propia

El análisis *post-hoc* mostró que, antes de usar el micromundo, no hubo diferencia significativa entre quienes pertenecían a organizaciones ambientales y quienes no ($M = -.231$, $SE = .283$, $p = .419$). Sin embargo, dicha diferencia aumentó después de usar el micromundo ($M = -.530$, $SE = .163$, $p = .002$). Los resultados indican que quienes participan en estas organizaciones son más afines y sensibles a los temas que trata el micromundo, lo cual los lleva a tener una mayor intencionalidad para tomar decisiones sostenibles en el mundo real. El resultado también es consistente con otras investigaciones que han documentado el papel vital que desempeñan las organizaciones ambientales en el fomento de la educación ambiental, el aprendizaje colaborativo y el diseño de políticas sostenibles (Longhofer et al., 2016; Wolbring & Gill, 2023).

Respecto a las siguientes características, no se encontraron efectos principales significativos sobre el puntaje de intención de comportamiento: género, edad, estructura familiar, nivel educativo, formación en temas ambientales, sector en que más ha trabajado, ingresos mensuales, zona rural/urbana, cuenca de residencia, tiempo de residencia, y familiaridad con juegos de simulación. Tampoco se encontraron interacciones significativas entre las características y el uso del micromundo. Al final del capítulo, en la Sección 5.5, se discutirá con mayor profundidad sobre todos los resultados del ANOVA que no fueron estadísticamente significativos.

5.4. Preguntas abiertas

Al final de cada cuestionario, se plantearon tres preguntas abiertas donde los participantes expresaron sus opiniones frente a la experiencia con el micromundo. A continuación, se presentan las preguntas realizadas y una síntesis de las respuestas.

- **“¿Qué fue lo que *más* le gustó de jugar con el micromundo?”**

Los participantes mencionaron que el taller les proporcionó nuevos conocimientos y conceptos que podrían aplicar en su vida cotidiana. Además, señalaron la utilidad del micromundo para aprender más sobre las cuencas y su sostenibilidad, participar activamente en la toma de decisiones y ver los efectos que éstas pueden tener en el largo plazo. De igual manera, el componente interactivo del taller fue muy valorado, así como el debate que se generó durante la toma de decisiones.

Adicionalmente, se destacó el hecho de que el taller permitiera aplicar teorías y conceptos a una situación concreta y real. Este enfoque práctico fue efectivo para ilustrar la relevancia de los temas impartidos. Finalmente, se resaltó el aspecto grupal del taller: la oportunidad de compartir con otros, discutir y debatir diferentes puntos de vista fue muy valorada.

- **“¿Qué fue lo que *menos* le gustó de jugar con el micromundo?”**

El 41.3 % de los participantes expresaron satisfacción general sobre la experiencia, destacando la claridad y el carácter lúdico de la actividad. Por otro lado, hubo un par de críticas divididas sobre la duración del juego: una persona encontró el juego demasiado extenso, mientras que dos participantes consideraron que el tiempo fue insuficiente para completar la actividad a fondo y profundizar en la discusión. Este fue un aspecto complejo de abordar durante el diseño del juego, ya que fue necesario considerar las restricciones de tiempo de muchos participantes y, a su vez, procurar que la actividad se desarrollase a cabalidad.

Dos participantes consideraron que el juego no representaba adecuadamente otras dimensiones importantes para la sostenibilidad, como la cultura, ni hacía suficiente énfasis en el sector productivo. En esta misma línea, hubo tres personas que cuestionaron las simplificaciones dentro del micromundo, y consideraron que los resultados no fueron realistas. Esto significa que, en total, cinco personas pusieron en duda la capacidad de la herramienta para representar adecuadamente la realidad. Si bien no representa una crítica mayoritaria, se recomienda para desarrollos futuros de micromundos implementar estrategias que aumenten su validez, ya que de ello dependerá su utilidad (Barlas, 1996). Finalmente, el 13 % de los participantes se sintieron frustrados por la cantidad limitada de puntos disponibles para tomar decisiones en el juego, mientras que el 8.6 %

se sintió insatisfecho porque no pudo lograr que el semáforo de sostenibilidad llegase a verde.

■ **“¿Qué cree que *le falta* a este juego?”**

El 17.4 % de las personas sugirieron modificaciones al sistema de puntos, bien fuese aumentar la cantidad disponible, o cambiar la forma en que se actualiza su disponibilidad. También se sugirió incluir otros aspectos de la realidad para aumentar su relevancia y profundidad, por ejemplo, más problemáticas sociales reales, evaluar las acciones de la comunidad, incluir más alternativas y decisiones que los jugadores puedan tomar.

El 15.2 % de los participantes sugirieron que el juego podría ser más útil si incorporara a otros actores relevantes, como la comunidad campesina y los gobernantes. Se recomendó la inclusión de otros aspectos ambientales, como puntos críticos de contaminación, minería, uso de energías alternativas versus convencionales, y movilidad. Adicionalmente, se expresó el deseo de que el juego tuviese más rondas para explorar diferentes decisiones y resultados, añadir elementos de contexto local para los jugadores, y ser más claro en la presentación de los indicadores de sostenibilidad. Finalmente, el 24 % de los participantes consideró que el juego estaba completo, bien estructurado, y que no requería ninguna mejora o cambio.

■ **Comentarios adicionales**

Al final del cuestionario, se dejó un espacio para comentarios y sugerencias que no fueron abordados en las preguntas anteriores. La recepción de la experiencia fue predominantemente positiva, ya que el 70 % de los participantes indicaron haber disfrutado de la actividad y la encontraron muy enriquecedora. Se manifestó interés por más talleres y educación de este tipo, así como el deseo de implementar o difundir el juego en otros contextos, por ejemplo, en instituciones educativas, programas de educación ambiental, en la formación de docentes, entre otros. Esto representa un paso importante hacia la apropiación social del conocimiento, ya que permite a los individuos adaptar y aplicar conceptos científicos y tecnológicos a sus propios contextos y necesidades (Romero-Rodríguez et al., 2020). Por último, se sugirieron tres mejoras o modificaciones al juego, a saber, la inclusión de más niveles en el semáforo, la posibilidad de empezar el juego desde cualquier fecha, y que el juego incluya diferentes tipos de cuencas.

En conclusión, se observó una recepción mayoritariamente positiva por parte de los participantes hacia la actividad con el micromundo. A pesar de que estas respuestas no formaron parte del análisis cuantitativo, su recolección sirve de base para mejorar la herramienta y apoyar el desarrollo de futuras investigaciones con micromundos bajo el enfoque de transdisciplinariedad. A su vez, abre la puerta a nuevas técnicas como la modelación en grupos, en

la cual se abordan todas las críticas, comentarios y sugerencias antes y durante la construcción del micromundo, otorgándole mayor validez y acogida a la herramienta (Neely, 2019; Smetschka & Gaube, 2020; Steger et al., 2021).

5.5. Observaciones finales

Los resultados de este capítulo muestran cómo el micromundo ORBEM es una herramienta efectiva para generar aprendizaje sobre sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos. Si bien esto es un indicio importante del potencial de los micromundos para apoyar el estudio transdisciplinar de los SSE, no basta solamente con desarrollar y publicar estas herramientas. Investigaciones recientes han mostrado que todas las personas no aprenden de la misma forma, y que los procesos de aprendizaje dependen de muchos factores como la personalidad, el entorno, las creencias, experiencias previas, entre otros (Nauzeer & Jaunky, 2021).

Para verificar la influencia de algunos atributos personales sobre el aprendizaje, se analizaron 13 características de los actores de un SSE, de las cuales ocho (8) no presentaron efecto principal o interacción sobre ninguno de los componentes de aprendizaje, mientras que las características restantes tuvieron un efecto sobre sólo uno o dos componentes (Tabla 5-4).

Tabla 5-4.: Compilado de las características y su incidencia sobre el aprendizaje.

Las siguientes características de los actores...	... tienen efecto sobre
Género	Conocimiento subjetivo
Formación en temas ambientales	
Pertenencia a organizaciones ambientales	
Ocupación	Intención de comportamiento
Estructura familiar	Actitud hacia las decisiones
Edad	Ningún componente
Nivel educativo	
Sector en que más ha trabajado	
Ingresos mensuales	
Zona rural o urbana	
Cuenca de residencia	
Tiempo de residencia	
Familiaridad con juegos de simulación	

Fuente: elaboración propia

Dado que el marco metodológico empleado en la investigación evalúa el cumplimiento simultáneo de los tres componentes para definir el aprendizaje, con base en los resultados, se

rechazan las hipótesis planteadas para las características en la Tabla **3-1**, y se concluye que estas no tienen incidencia sobre el aprendizaje de los actores evaluados (o, en el mejor de los casos, tienen una incidencia parcial).

Ahora bien, el hecho de que no se hayan encontrado efectos o interacciones de algunas características sobre el aprendizaje, no significa que estos no existan en el mundo real. En primer lugar, es posible que, para las características con más de dos niveles³, la ausencia de resultados significativos obedezca al pequeño tamaño de la muestra, ya que la potencia estadística del ANOVA disminuye con la adición de niveles en las variables independientes, lo cual, a su vez, puede dificultar la capacidad para detectar diferencias que sí existen. Este sería el caso de la edad, nivel educativo, sector en que más ha trabajado, ingresos mensuales y tiempo de residencia.

Por otro lado, también es posible que las características que no mostraron resultados significativos en el aprendizaje lo hicieran a través de mecanismos más sutiles o indirectos que no fueron capturados en el diseño del juego. Por ejemplo, aunque la familiaridad con juegos de simulación resultó no ser un predictor significativo del aprendizaje en este estudio, podría influir de forma indirecta a través de variables como la motivación o la atención del participante, las cuales no fueron objeto de esta investigación. Por último, las características de ubicación geográfica sugieren que el micromundo aborda conceptos y procesos de los SSE que son aplicables a diversos contextos geográficos y que, por consiguiente, no dependen de la cuenca o zonificación (rural/urbana) en la que resida el individuo.

Una advertencia final sobre la interpretación de los análisis de varianza es que un resultado significativo de una variable independiente no quiere decir que ésta explique en su totalidad un aumento en el puntaje de un componente de aprendizaje. Hubo otros factores (quizá más relevantes) que no se tuvieron en cuenta dado el alcance de la investigación. Un ejemplo de estos factores son los rasgos de la personalidad, los cuales han sido muy evaluados en estudios sobre el aprendizaje (Cazan & Schiopca, 2014; Chamorro-Premuzic & Furnham, 2008).

³Cada variable independiente se compone de dos o más niveles o grupos. Por ejemplo, la variable “Nivel educativo” consta de cuatro niveles: 1) primaria, 2) bachillerato, 3) técnica/tecnología, 4) profesional o superior.

6. Conclusiones

La pregunta que motivó esta investigación fue: *¿Cómo influyen las características de los diferentes actores de un sistema socio-ecológico de cuenca en su proceso de aprendizaje y sobre la toma de decisiones?* Para responder a esta pregunta, se construyó un micromundo de un SSEC a partir de los trabajos de Marrero-Trujillo (2020) y Berrío-Giraldo (2020). El diseño de la herramienta implicó la definición del objetivo de aprendizaje, público objetivo, la adaptación de un modelo dinámico, el diseño del entorno virtual y pruebas piloto. Una vez finalizado, el micromundo se puso en funcionamiento con 50 actores de la cuenca del Río Negro (Antioquia), a lo largo de seis talleres. Durante los talleres, se aplicaron dos cuestionarios a cada participante, con el fin de recolectar los siguientes datos: (i) puntajes de aprendizaje y (ii) características de los actores. A partir de estos datos se pudo analizar el efecto del micromundo y de las características sobre el aprendizaje de las personas.

Los resultados mostraron un aumento significativo en el aprendizaje de los participantes luego de la sesión de juego con el micromundo. Es decir, los participantes cambiaron sus percepciones, actitudes y motivaciones sobre el efecto que distintas decisiones tienen en la sostenibilidad de un SSE. Por tanto, es factible esperar un cambio en su comportamiento dentro del SSE real, en aras de alcanzar su sostenibilidad. Adicionalmente, se evaluó si el aprendizaje logrado también estuvo influenciado por atributos individuales de los participantes. De esta manera, se analizaron 13 características de los actores, de las cuales 5 tuvieron un efecto significativo sobre el aprendizaje: género, formación en temas ambientales, ocupación, estructura familiar y pertenencia a organizaciones ambientales. En cuanto a las 8 características restantes, no se encontró ningún efecto o interacción significativos sobre el aprendizaje de los actores. Sin embargo, esto no implica que dichas características sean irrelevantes en el SSE real, ya que se requieren más investigaciones que profundicen en la influencia de estas variables.

Los resultados de las características de los actores muestran que el micromundo es una herramienta útil y novedosa para cerrar brechas en el conocimiento, siendo particularmente beneficioso para mujeres y estudiantes. De igual manera, los resultados resaltan la importancia de los procesos formativos en temas ambientales, tanto formales como informales, y su impacto positivo sobre el aprendizaje de sostenibilidad. Se destaca también el rol de las organizaciones ambientales y del sector público, presentándose como potenciales actores estratégicos en la toma de decisiones sostenibles dentro de los territorios. Por último, se

observó que las personas con hijos son un público sensible a la herramienta y que, por tanto, sería pertinente diseñar intervenciones y programas específicos para padres, en los que se resalte cómo las decisiones sostenibles pueden afectar el futuro de sus descendientes. Así, se enfatiza la necesidad de diseñar estrategias de aprendizaje que aborden de manera integral y minuciosa los diferentes matices de los actores de un SSE. Esto permitiría alcanzar los objetivos de aprendizaje propuestos y garantizar la igualdad de condiciones entre los actores para la toma de decisiones sostenibles.

Las respuestas a las preguntas abiertas sugieren que el micromundo no debería limitarse a ser solamente un ejercicio académico, sino que es pertinente explorar su uso como una herramienta práctica para la optimización de toma de decisiones. En ese sentido, dada la metodología empleada, es perfectamente viable personalizar el micromundo según la cuenca hidrográfica o sistema socio-ecológico que se desee. Es decir, el modelo subyacente se puede modificar y parametrizar atendiendo a las características particulares de otras cuencas y a las necesidades de sus actores. Ahora bien, a pesar de que ORBEM se desarrolló con base en la cuenca del Río Grande y Chico, el propósito siempre fue aumentar la comprensión sobre la complejidad de las cuencas en general. Siguiendo la analogía de los simuladores de vuelo (presentada en la Sección 2.2), un piloto puede practicar sus aterrizajes en el aeropuerto de Chicago, pero adquirir la habilidad para hacerlo en cualquier otro aeropuerto del mundo. De esta manera, los usuarios de ORBEM también se entrenan en la comprensión de las cuencas como sistemas complejos.

Finalmente, se encontró que los talleres con el micromundo crearon un interés en las personas para seguir aprendiendo sobre el tema y para tomar decisiones más informadas. Esto es, el micromundo crea un ambiente de aprendizaje que favorece la concentración, la motivación por aprender y la curiosidad. Estos hallazgos, en conjunto, son consistentes con el análisis cuantitativo por componentes de aprendizaje, y representan un paso importante hacia la apropiación social del conocimiento. El micromundo muestra un potencial considerable para cualquier contexto donde sea importante entender la dinámica de los sistemas socio-ecológicos para su gestión sostenible, por ejemplo, en espacios de capacitación con grupos comunitarios y organizaciones ambientales, en la formación de funcionarios públicos responsables de la gestión ambiental o del desarrollo regional, e incluso en investigaciones académicas como una herramienta para analizar estudios de caso y generar nuevos conocimientos sobre sostenibilidad y SSE.

6.1. Limitaciones del estudio y recomendaciones

- **Muestra del público objetivo.** El proceso de muestreo de la investigación consistió en invitar a alrededor de 100 personas representativas de cada grupo del público objetivo. No obstante, la tasa de respuesta fue baja, ya que al final sólo asistió la mitad

de los invitados. De esto hay que destacar, en primer lugar, la nula participación del gremio de productores, lo cual representa una limitación importante del estudio debido a que actividades como la floricultura tienen mucho peso en las dinámicas internas de la cuenca del Río Negro (CORNARE, 2016). La causa de esta limitación se atribuye a que, como anotaban Franz et al. (2010), “muchos campesinos participan en programas educativos si dichos programas son relevantes y atienden directamente a sus necesidades” (Franz et al., 2010, p. 39). Así, es probable que los productores contactados para participar en nuestro estudio considerasen que el uso del micromundo no era relevante para ellos ni atendía a sus necesidades, y que su asistencia no justificaba el costo de oportunidad que implicaba “sacrificar” dos horas de su tiempo por estar en el taller del micromundo. Dos propuestas para abordar esta limitación son: (i) diseñar mejores estrategias de convocatoria en las que se enfatizan las ventajas del micromundo (por ejemplo, como una herramienta que ayuda a entender el efecto de la degradación de los servicios ecosistémicos sobre la productividad de los cultivos y, por consiguiente, sobre su rentabilidad), y (ii) implementar incentivos monetarios en el diseño de los talleres, por ejemplo, definiendo un esquema de premios según el estado de sostenibilidad que alcance el participante al finalizar las cuatro rondas (para esto, la dinámica de juego ya no sería grupal, sino individual). Se ha demostrado que estos incentivos “pueden ser útiles para aumentar las tasas de participación y ayudar a reducir los sesgos de muestreo” (Guyll et al., 2003), aunque su implementación en experimentos con micromundos han mostrado efectos variados sobre el desempeño de los participantes (Stouten et al., 2012, p. 766; Sweeney & Sterman, 2000), por lo cual habría que evaluar con cuidado esta solución.

El segundo aspecto por destacar en relación con la muestra del público objetivo es que, como se mencionó en la Sección 5.2, hubo dos grupos predominantes en la muestra: estudiantes y personas con interés en temas ambientales. Dichos actores tuvieron las mayores tasas de asistencia a los talleres, posiblemente porque vieron en el micromundo una herramienta útil para sus propósitos, bien sea por su ejercicio profesional y formativo, o por preferencias personales. Esto introdujo un sesgo de selección en la muestra, y constituye una limitación importante del estudio ya que no fue posible tener una representación fidedigna de todos los actores dentro del SSE y, por tanto, no se pueden generalizar los resultados del estudio a todos los habitantes de la cuenca. Sin embargo, esto no demerita los hallazgos hasta ahora reportados, ya que, por un lado, los estudiantes son “un factor potencial de cambio para apoyar la implementación efectiva de acciones de gestión ambiental. (...) [A]lcanzar la sostenibilidad en el largo plazo requiere que las futuras generaciones de ciudadanos, líderes políticos y científicos desarrollen competencias clave para superar los cada vez más apremiantes desafíos socio-ecológicos” (Burgos-Ayala et al., 2022). Por otro lado, las personas con interés en temas ambientales pueden ser las más propensas a adoptar y usar micromundos

en la práctica. Además, podrían actuar como promotores de la herramienta en sus respectivas comunidades y sectores, lo que podría facilitar una adopción más amplia en el futuro. De esta manera, a pesar de que los resultados de nuestro estudio no son generalizables, sí brindan información valiosa acerca del efecto de las características de públicos potencialmente relevantes para la sostenibilidad de la cuenca.

Aun así, se recomienda para estudios futuros implementar técnicas de muestreo probabilístico (p. ej., muestreo aleatorio simple), en las que “cada ítem en la población tenga la misma probabilidad de ser incluido en la muestra” (Taherdoost, 2016), sin olvidar que dichas técnicas requieren de mayores inversiones de tiempo, recursos, tener acceso a una lista completa de la población y la posibilidad latente de que algunos elementos de la población no puedan ser incluidos en la muestra (Taherdoost, 2016). Finalmente, al igual que con los productores, vale la pena pensar en mejores estrategias para publicitar el micromundo y en premios monetarios para incentivar la participación de los actores.

- **Dinámica de juego.** Aún existen barreras importantes en el acceso y familiaridad de muchas personas hacia herramientas tecnológicas (p. ej., personas que no saben utilizar un computador). En nuestro intento por soslayar dichas barreras, y como resultado de las pruebas piloto, propusimos una dinámica que combinaba juego de roles con grupos focales, en las que el público no tenía que preocuparse por manejar una interfaz de computador sino simplemente participar activamente en la discusión, visualizar y analizar los resultados, todo mientras un moderador guiaba la sesión. El principal inconveniente de esto es que la teoría de micromundos se basa en el enfoque pedagógico del construccionismo, que plantea la existencia de “objetos transicionales” con los que el estudiante (o usuario) interactúa de forma autónoma, siendo esa experimentación directa la que puede generar un aprendizaje (Marrero-Trujillo, 2020; Papert, 1980; Senge, 1994). No obstante, también hay autores que controvierten esta premisa al afirmar que “a menudo, los micromundos se venden como soluciones educativas por derecho propio, sin calificación sobre los tipos de actividades que deberían estructurar su uso o dirección” (Miller et al., 1999, p. 2). Por este motivo, quien decida emprender la tarea de diseñar un micromundo, debe sopesar muy bien cómo sus usuarios interactuarán con la herramienta, buscando un equilibrio entre accesibilidad y cumplimiento de los objetivos de aprendizaje. Si bien Sterman (2000) afirma que para sistemas de alta complejidad es recomendable la simulación computacional, los resultados de nuestra investigación mostraron que esta vía no siempre es la mejor opción, frente a lo cual vale la pena evaluar alternativas como juegos de mesa, de cartas, con fichas, etc.
- **Metodología de evaluación de aprendizaje.** La metodología de medición y evaluación del aprendizaje se basó en el trabajo de Stouten et al. (2012), quienes propusieron

un marco metodológico de tres componentes medidos a través de “experimentos antes-después con grupo de control”. Sin embargo, este último aspecto no se tuvo en cuenta en la investigación debido a que, desde el segundo objetivo específico, ya se había condicionado a que la comparación del aprendizaje iba a ser sobre una misma muestra poblacional en dos períodos de tiempo distintos. Esta es una limitación importante de la tesis, ya que no sabemos si las diferencias en el aprendizaje realmente son más significativas en comparación con otros métodos de enseñanza. La metodología tampoco permite evaluar el aprendizaje a largo plazo, ya que toda la sesión se desarrolla en un intervalo máximo de dos horas, por lo cual se necesitaría de un estudio longitudinal para analizar, primero, si el aprendizaje persiste en el tiempo y, segundo, si el aprendizaje logrado con el micromundo tiene una incidencia directa sobre las decisiones que toman las personas en el sistema real.

6.2. Trabajo futuro

A continuación, se plantean algunas rutas para investigaciones futuras:

- **Construcción de micromundos usando otros enfoques de modelación:** el modelo subyacente en ORBEM utiliza el enfoque de dinámica de sistemas, el cual es útil para representar ciclos de realimentación, retardos y no linealidades de los sistemas socio-ecológicos. Sin embargo, vale la pena explorar el diseño de micromundos a partir de otros enfoques, como redes bayesianas o modelación basada en agentes, ya que también son adecuados para modelar SSE y permiten, por ejemplo, analizar las interacciones entre los individuos y su impacto dentro del sistema.
- **Nuevos marcos evaluativos de aprendizaje:** a pesar del valioso esfuerzo de Stouten et al. (2012), aún existe en la literatura un vacío importante de metodologías que midan y evalúen el aprendizaje con micromundos de forma rigurosa y objetiva. Se recomienda diseñar nuevas metodologías que incluyan otros componentes de aprendizaje además del conocimiento subjetivo, actitud e intención, así como explorar otros instrumentos de medición diferentes a cuestionarios.
- **Comparación con otras herramientas de aprendizaje:** este ítem alude a la última limitación expuesta en la sección anterior, ya que existen herramientas como videojuegos, videos interactivos, entre otros, que quizá generen un aprendizaje igual o mayor que el de los micromundos. Para ello, se recomienda conducir investigaciones que implementen un diseño experimental robusto, con la inclusión de grupos de control y de tratamiento. La comparación de resultados entre grupos permitiría discernir de manera más precisa el impacto relativo de cada herramienta en la generación de aprendizaje sobre sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos

- **Evaluación de resultados a largo plazo:** para evaluar si el aprendizaje con el micromundo persiste en el tiempo y si, efectivamente, se traduce en un mejor desempeño de los actores en el mundo real, se recomienda llevar a cabo estudios longitudinales. En estos estudios se realizarían talleres adicionales con el micromundo en intervalos regulares durante un período extenso, que abarquen varios meses o, incluso, años. Los resultados ayudarían a entender cómo los participantes incorporan y utilizan el aprendizaje en su toma de decisiones cotidianas dentro de un SSE.
- **Características de los actores:** se requieren más estudios para validar los efectos de las 13 características planteadas en esta investigación. Adicionalmente, se recomienda ampliar el espectro de características analizadas, incorporando aspectos como rasgos de personalidad, atributos psicológicos o medidas objetivas de la inteligencia, como el cociente intelectual. De esta forma, se contribuiría a maximizar la eficacia de las intervenciones educativas y adaptarlas a las necesidades específicas de cada actor.

A. Anexo: Variables del modelo

Se presentan las principales variables del modelo con sus respectivas ecuaciones, las cuales se obtuvieron y adaptaron de Berrio-Giraldo (2020) y Builes et al. (2022).

Variable	Ecuación	Unidad
Tasa de conversión de cobertura i a cobertura j	$TC_{i \rightarrow j} = \frac{MIN(\text{área deseada}_j - \text{área actual}_j; \text{área actual}_i)}{\text{tiempo de transición}_{i \rightarrow j}}$	$\left[\frac{\text{ha}}{\text{día}} \right]$
Área de cultivos	$C(t) = C(0) + \int_0^t (TC_{P \rightarrow C} + TC_{B \rightarrow C} - TC_{C \rightarrow P} - TC_{C \rightarrow B}) dt$	[ha]
Área de pastos	$P(t) = P(0) + \int_0^t (TC_{C \rightarrow P} + TC_{B \rightarrow P} - TC_{P \rightarrow C} - TC_{P \rightarrow B}) dt$	[ha]
Área de bosque	$B(t) = B(0) + \int_0^t (TC_{C \rightarrow B} + TC_{P \rightarrow B} - TC_{B \rightarrow C} - TC_{B \rightarrow P}) dt$	[ha]
Atractividad ¹	$\alpha_m = \frac{e^{\beta_m \cdot \mathbf{x}_i}}{\sum_{j=1}^{M=3} e^{\beta_j \cdot \mathbf{x}_i}} * 100$	[%]

¹Donde $M = 3$ corresponde a las alternativas o categorías evaluadas (i.e., bosque, pasto y cultivo), m es la cobertura que se esté evaluando en ese momento, β es el vector de coeficientes de regresión y \mathbf{x} es el vector de criterios o variables explicativas para cada observación i .

Variable	Ecuación	Unidad
Oferta de agua superficial	$O = \text{esc. superficial} + \text{esc. subsuperficial} + \text{flujo base}$	$\left[\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right]$
Tasa de erosión ²	$E_r = R * K * LS * F_C * F_P$	$\left[\frac{\text{ton}}{\text{día} \cdot \text{ha}} \right]$
Control de la erosión	$CE = E_{máx} - E_r$	$\left[\frac{\text{ton}}{\text{día} \cdot \text{ha}} \right]$
Cambio en la PSR ³	$\Delta_{PSR} = \text{MAX}([A_{\text{agua}} * 0,65 + A_{\text{erosión}} * 0,35] * \Phi; -PSR/DT)$	$[\text{día}^{-1}]$
PSR	$PSR = PSR(0) + \int_0^t (\Delta_{PSR}) dt$	$[\text{adim.}]$
Actividad de organizaciones comunitarias ⁴	$AOC = \text{MIN}(1; \Phi * [L * 0,8 + Pa * 0,2] * [1 + PSR_n])$	$[\text{adim.}]$

²Donde R es el factor de erosividad de la lluvia, K es el factor de erodabilidad del suelo, LS es el factor topográfico, FC es el factor de cobertura y FP es el factor de prácticas de manejo

³Donde A_{agua} es la amenaza por déficit de agua, $A_{\text{erosión}}$ es la amenaza por pérdida de suelo, $\Phi = P_C/P_T$ es el porcentaje de personas concientizadas en toda la cuenca, PSR es la percepción social del riesgo y DT es el paso de tiempo de la simulación.

⁴Donde L es el liderazgo comunitario, Pa es la participación ciudadana en la toma de decisiones, y PSR_n es la percepción social del riesgo normalizada

Variable	Ecuación	Unidad
Población alcanzada ⁵	$PA = PI * TS * (1 + AOC * 0,25)$	[personas]
Articulación entre actores ⁶	$AA = (AOC * 0,25 + EAA * 0,4 + AOA * 0,35) * NC$	[adim.]
Concientización ⁷	$Con = MIN \left(\frac{PA}{t_r} * AA; \frac{P_T - P_C}{DT} \right)$	$\left[\frac{\text{personas}}{\text{día}} \right]$
Población concientizada	$P_C = P_C(0) + \int_0^t (Con) dt$	[personas]
Tradición de conservación	$trad_c = GRAPH(\Phi * [1 + PSR_n])$	[adim.]
Sostenibilidad ⁸	$S = \text{IF } (CE < U_E \text{ OR } O < U_O) \\ \text{THEN } 0 \\ \text{ELSE} \\ \text{IF } (Ac < U_{Ac} \text{ AND } NC < U_{NC} \text{ AND} \\ \Phi < U_\phi \text{ AND } \sum Rent. < 0) \\ \text{THEN } 1 \\ \text{ELSE } 2$	[adim.]

⁵Donde PI es el número de personas invitadas a procesos de educación ambiental y TS es la tasa de sensibilización.

⁶Donde EAA es la eficiencia de la autoridad ambiental, AOA es la actividad de organizaciones ambientales, y NC es el nivel de confianza hacia la autoridad ambiental.

⁷Donde t_r es el tiempo que tarda en surtir efecto los procesos de educación, P_T es la población total de la cuenca, P_C es la población concientizada y DT es el paso de tiempo de la simulación. La función $MIN()$ garantiza que P_C no exceda la población total de la cuenca.

⁸Donde $\sum Rent.$ es la suma de rentabilidades de las actividades económicas de la cuenca, y U_i equivale a los umbrales definidos por Gómez-Jaramillo (2023) para cada indicador i . Si $S = 0$, la cuenca no es sostenible; si $S = 1$, la cuenca es parcialmente sostenible; y si $S = 2$, la cuenca es sostenible.

Variable	Ecuación	Unidad
Aceptabilidad ⁹	$Ac = MAX(Pa * 0,25 + \alpha_B * 0,25 + NC * 0,25 - [A_{prot}/A_T] * 0,25; 0)$	[adim.]

⁹Donde α_B es la atractividad de bosques, A_{prot} es el área protegida en la cuenca, y A_T es el área total de la cuenca. La función $MAX()$ evita que la aceptabilidad tome valores negativos.

B. Anexo: Pruebas de condiciones extremas

Figura B-1.: Valor inicial de bosques al 100%

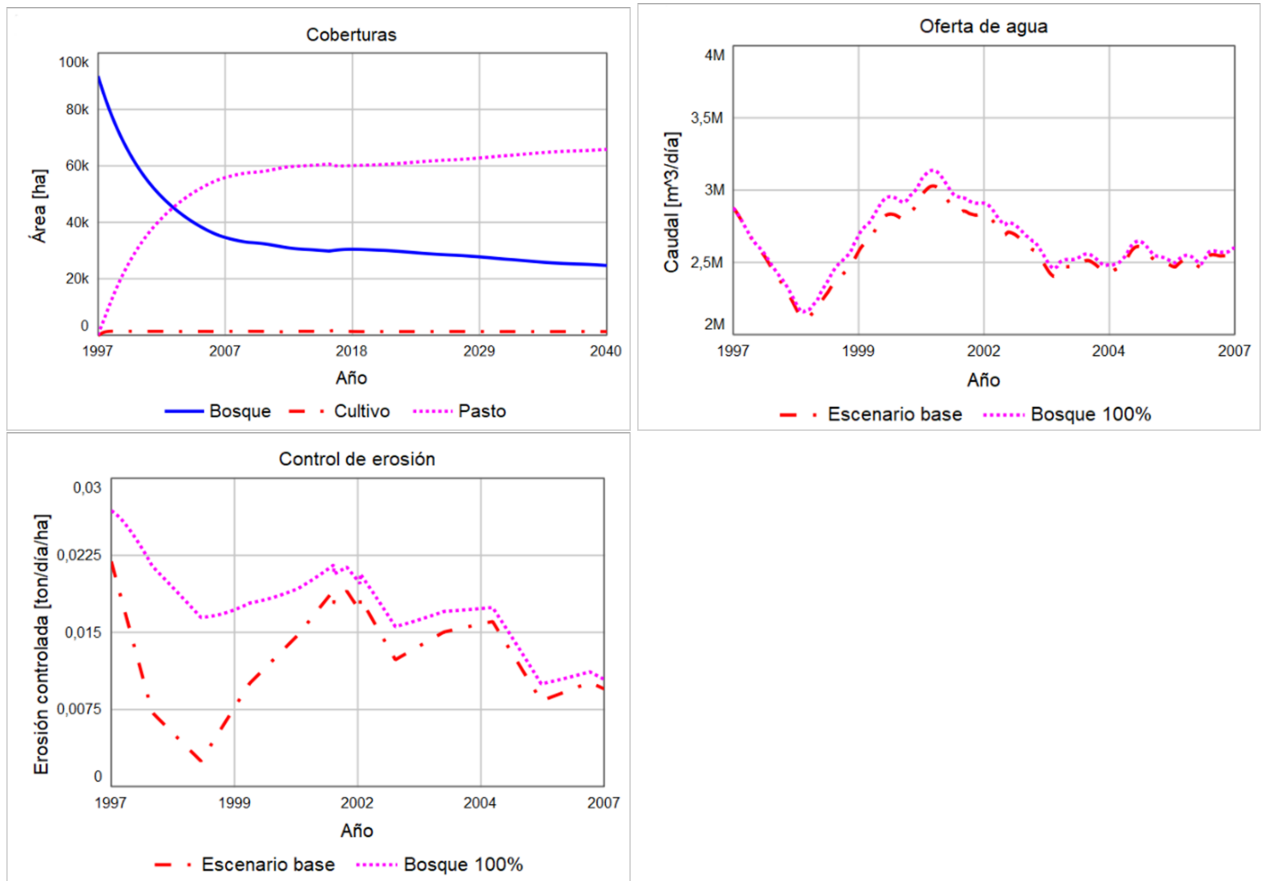


Figura B-2.: Valor inicial de pastos al 100 %

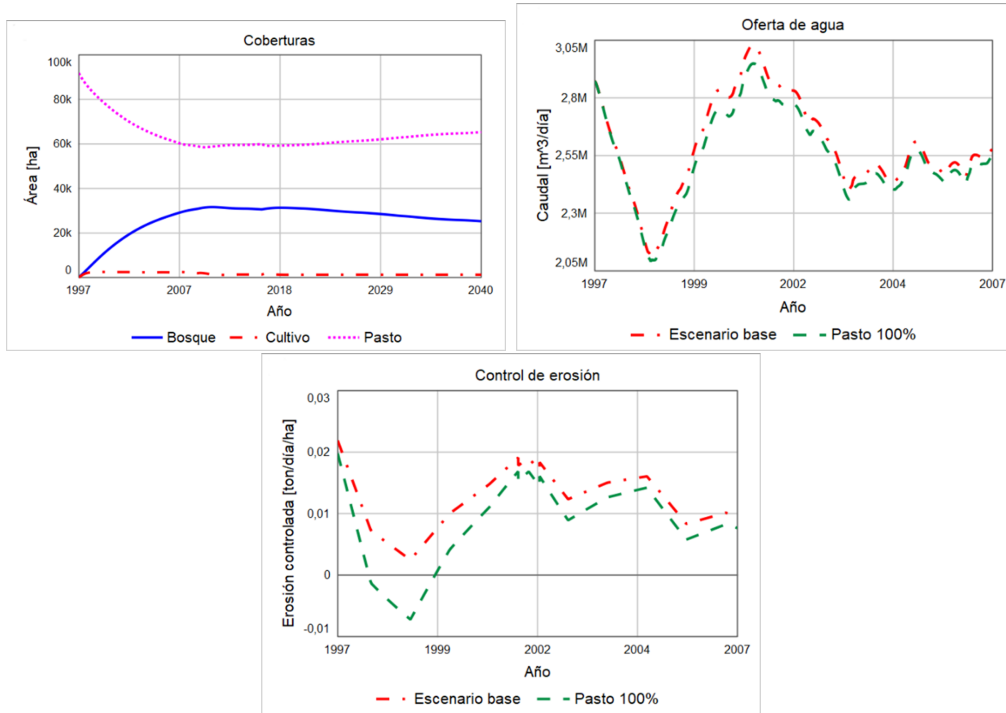
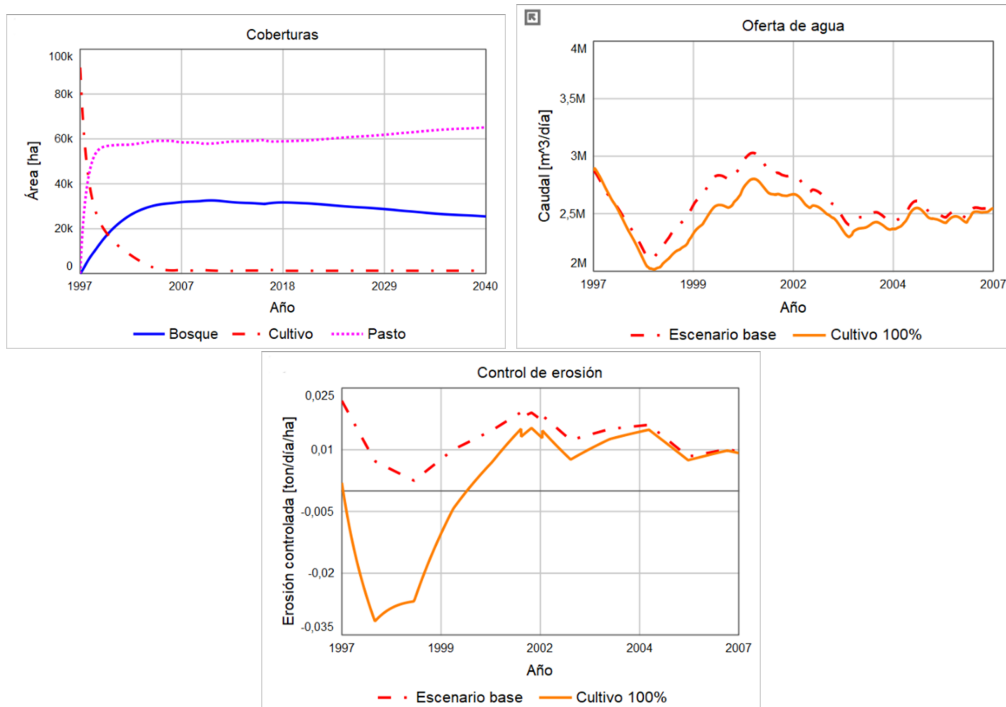


Figura B-3.: Valor inicial de cultivos al 100 %



C. Anexo: Brochure con las instrucciones del juego

GUÍA DE INSTRUCCIONES

Contexto

En un país llamado Utopía existen grupos de expertos llamados "**Comités de Gestores de Cuencas Sostenibles**", cuya única tarea es bastante evidente: hacer que las cuencas sean sostenibles.

Para ello, los Gestores deben convocar a una reunión a los representantes de los principales actores de la cuenca, y en esa reunión les deben indicar las acciones puntuales que tienen que llevar a cabo para que la cuenca sea sostenible.

Usted forma parte del Comité de Gestores de la cuenca del Río Nevado, al norte del país. En unos días debe reunirse con los representantes de los siguientes actores:

- Ministerio de Ambiente (P1)
- Ministerio de Agricultura (P2)
- Alcaldías y gobernación (P3)
- Autoridad ambiental (P4)
- Organizaciones ambientalistas (P5)
- Productores (agricultores y ganaderos) (P6)

Para poder cumplir con su tarea, el Comité convocó hoy una sesión extraordinaria, en la que van a usar un micromundo de la cuenca del Río Nevado para informarse sobre las mejores decisiones que pueden tomar estos actores para que la cuenca sea sostenible. Es decir, es un "entrenamiento" antes de su reunión con los representantes de los actores.

Objetivo del juego

Este es un **juego de decisiones** en el que, mediante el uso de un micromundo, usted deberá tomar decisiones con el fin de llevar la cuenca del Río Nevado a la sostenibilidad durante el mayor número de años posible.

¿Cómo se juega?

1) Hay un moderador encargado de guiar el juego y manipular el micromundo. El resto de los participantes son los miembros del Comité de Gestores de Cuenca del Río Nevado.

2) El juego se desarrolla entre los años 2020 y 2040, y consiste en 4 rondas, donde cada ronda abarca un período de 5 años.

3) En cada una de las rondas se le presentará al Comité un abanico de decisiones (explicadas más adelante), y el Comité dispondrá de algunos minutos por ronda para llegar a un consenso sobre las decisiones que tomará.

4) Una vez llegados a un acuerdo, el Comité informará al moderador la decisión a ingresar en el micromundo. Si el comité es incapaz de llegar a un consenso, el moderador no ingresará ninguna decisión y continuará el juego.

5) Antes de pasar a la siguiente ronda, el moderador presentará los resultados, es decir, los efectos que tuvieron las decisiones sobre la cuenca.

6) El juego acaba cuando se tomen las decisiones en la cuarta ronda y se llegue al año 2040.

Restricciones

I) Las decisiones NO son gratuitas. Usted cuenta con una "bolsa" de 25 puntos que se irán gastando cada vez que tome decisiones. Úselos sabiamente.

II) El micromundo NO incluye todas las posibles decisiones ni todos los posibles indicadores para medir la sostenibilidad de una cuenca del mundo real, ya que, de hacerlo, la experiencia de juego sería mucho más compleja.

Panel de resultados

Luego de tomar las decisiones en cada ronda, usted verá una página de resultados con los siguientes elementos:

A) **Indicador de sostenibilidad:** un semáforo que le indicará lo siguiente: rojo, la cuenca NO es sostenible; amarillo, la cuenca es parcialmente sostenible; verde, la cuenca es sostenible.



B) **Servicios ecosistémicos:** son los beneficios que la naturaleza le brinda a los seres humanos. En la cuenca del Río Nevado, los más importantes son *regulación hídrica y control de la erosión*. Son los que definen los límites ecológicos de la sostenibilidad.

C) Actividades económicas: muestra las principales actividades económicas de la cuenca: *ganadería, agricultura y conservación de bosques*. Definen parcialmente la base social de la sostenibilidad.

D) Aspectos sociales: muestra las principales variables relacionadas con la percepción de las personas hacia el medio que las rodea: *aceptabilidad, concientización y confianza*. Definen parcialmente la base social de la sostenibilidad.

E) Coberturas: son como la "ropa" que cubre al suelo. Las principales coberturas de la cuenca son: *bosques, pastos y cultivos*.

Si bien el principal indicador es el de sostenibilidad, todos los indicadores están conectados entre sí. Por eso, es muy importante analizarlos en conjunto para entender mejor los efectos de las decisiones.

Decisiones

INSTRUMENTOS EDUCATIVOS (P4,P5)

Procesos de educación ambiental: usted puede decidir si en la cuenca se implementan o no talleres, conferencias, capacitaciones, cursos, etc., para la educación ambiental de la comunidad.

Efectividad de los procesos de educación: se refiere a la proporción de habitantes que participan de estos procesos y si se aplican estrategias pedagógicas (juegos de roles, debates, etc.)

SOBRE LA COMUNIDAD (P3,P4)

Inversión en proyectos comunitarios y apoyo a líderes sociales: es la inversión en forma de medios materiales a proyectos comunitarios con enfoque ambiental, y el apoyo a líderes sociales para aumentar su capacidad de convocatoria.

ADMINISTRATIVAS (P4)

Disponibilidad de profesionales ambientales: es la cantidad disponible de profesionales para hacer cumplir las normas ambientales en la cuenca.

Programas de mejora continua: es la disponibilidad de estrategias de mejora y su grado de implementación por parte de la autoridad ambiental.

Programas de acompañamiento para cumplir normatividad: es la disponibilidad e implementación de programas de acompañamiento a la comunidad para el cumplimiento de las normas ambientales.

Grado de rendición de cuentas: es la frecuencia y divulgación de reportes de rendición de cuentas de la autoridad ambiental hacia la comunidad.

DISEÑO DE POLÍTICAS PÚBLICAS (P1,P2,P3,P4)

Espacios de concertación entre diseñadores de políticas: es la disponibilidad y frecuencia de espacios para el trabajo conjunto entre diseñadores de políticas ambientales y agropecuarias en la cuenca.

Programas de fortalecimiento del Consejo de Cuenca: es la disponibilidad e implementación de programas que aumenten la representación de la comunidad en el Consejo de Cuenca.

INSTRUMENTO ECONÓMICO (P4,P5)

Pago por Servicios Ambientales (PSA): es un programa que consiste en pagarle a habitantes de la cuenca por conservar bosques dentro de sus predios.

FORMAS DE PRODUCCIÓN (P6)

Tipo de ganadería: puede escoger entre ganadería tradicional (agroquímicos, razas de vacas foráneas, alimentación con complemento, entre otros) y ganadería alternativa (abonos orgánicos, razas de vacas locales, alimentación alternativa, sistema silvopastoril).

Prácticas de manejo de cultivos: puede decidir si implementa o no técnicas que reduzcan la pendiente de los suelos de cultivo (ejemplo: barreras vivas, cultivo en contorno).

MOTIVACIONES DE REPUTACIÓN (P6)

Es el grado de importancia que dan los productores al prestigio percibido por realizar su oficio. Aplica para las actividades económicas de la cuenca.

D. Anexo: Resultados de los análisis de varianza (ANOVA)

Tabla D-1.: Resultados para conocimiento subjetivo

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Género	1, 47	4.33 *	.084	.043
Momento	1, 47	11.70 **	.199	.001
Género \times Momento	1, 47	2.15	.044	.149
Edad	3, 45	1.92	.114	.140
Momento	1, 45	7.47 **	.142	.009
Edad \times Momento	3, 45	1.20	.074	.321
Cuenca	1, 48	1.98	.040	.166
Momento	1, 48	10.02 **	.173	.003
Cuenca \times Momento	1, 48	0.80	.016	.374
Antigüedad	3, 46	1.13	.068	.348
Momento	1, 46	16.68 ***	.266	<.001
Antig. \times Momento	3, 46	0.81	.050	.495
Educación	3, 46	0.63	.040	.598
Momento	1, 46	3.05 +	.062	.087
Edu. \times Momento	3, 46	1.81	.105	.159
Formación Ambiental	1, 48	15.12 ***	.240	<.001
Momento	1, 48	21.43 ***	.309	<.001
Form. Amb \times Momento	1, 48	2.77	.054	.103
Ocupación	3, 46	1.08	.066	.365
Momento	1, 46	18.68 ***	.289	<.001
Ocup. \times Momento	3, 46	2.69 +	.149	.057
Sector	10, 37	2.00 +	.351	.062
Momento	1, 37	2.64	.067	.113

Tabla D-1.: Resultados para conocimiento subjetivo

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Sector \times Momento	10, 37	1.92 +	.341	.074
Zona	1, 48	0.15	.003	.700
Momento	1, 48	5.75 *	.107	.020
Zona \times Momento	1, 48	0.20	.004	.658
Pertenencia a orgs. ambientales	1, 48	7.60 **	.137	.008
Momento	1, 48	3.30 +	.064	.076
Pertenencia \times Momento	1, 48	1.63	.033	.208
Hijos	1, 48	0.32	.007	.572
Momento	1, 48	11.70 ***	.196	.001
Hijos \times Momento	1, 48	0.22	.005	.639
Experiencia con simulación	1, 48	1.33	.027	.255
Momento	1, 48	18.51 ***	.278	<.001
Exp. Sim \times Momento	1, 48	3.90 +	.075	.054
Ingresos	4, 43	0.12	.011	.974
Momento	1, 43	9.59 **	.182	.003
Ingresos \times Momento	4, 43	1.92	.151	.125

Fuente: elaboración propia en RStudio

Tabla D-2.: Resultados para actitud hacia las decisiones

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Género	1, 47	1.20	.025	.279
Momento	1, 47	29.71 ***	.387	<.001
Género \times Momento	1, 47	0.18	.004	.670
Edad	3, 45	1.37	.084	.264
Momento	1, 45	11.67 **	.206	.001
Edad \times Momento	3, 45	0.79	.050	.507

Tabla D-2.: Resultados para actitud hacia las decisiones

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Cuenca	1, 48	0.39	.008	.533
Momento	1, 48	21.69 ***	.311	<.001
Cuenca \times Momento	1, 48	2.41	.048	.127
Antigüedad	3, 46	1.81	.106	.158
Momento	1, 46	28.53 ***	.383	<.001
Antig. \times Momento	3, 46	0.86	.053	.470
Educación	3, 46	1.42	.085	.249
Momento	1, 46	21.55 ***	.319	<.001
Edu. \times Momento	3, 46	1.08	.066	.368
Formación Ambiental	1, 48	1.87	.038	.177
Momento	1, 48	36.03 ***	.429	<.001
Form. Amb \times Momento	1, 48	0.00	<.001	.974
Ocupación	3, 46	0.28	.018	.841
Momento	1, 46	19.96 ***	.303	<.001
Ocup. \times Momento	3, 46	0.64	.040	.592
Sector	10, 37	0.45	.109	.908
Momento	1, 37	10.72 **	.225	.002
Sector \times Momento	10, 37	1.51	.290	.174
Zona	1, 48	0.92	.019	.343
Momento	1, 48	12.29 ***	.204	<.001
Zona \times Momento	1, 48	0.36	.007	.550
Pertenencia a orgs. ambientales	1, 48	0.33	.007	.568
Momento	1, 48	13.57 ***	.220	<.001
Pertenencia \times Momento	1, 48	0.26	.005	.615
Hijos	1, 48	0.93	.019	.339
Momento	1, 48	42.97 ***	.472	<.001
Hijos \times Momento	1, 48	6.19 *	.114	.016
Experiencia con simulación	1, 48	0.03	<.001	.873
Momento	1, 48	39.04 ***	.449	<.001

Tabla D-2.: Resultados para actitud hacia las decisiones

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Exp. Sim \times Momento	1, 48	0.67	.014	.417
Ingresos	4, 43	1.54	.125	.208
Momento	1, 43	23.59 ***	.354	<.001
Ingresos \times Momento	4, 43	0.97	.083	.435

Fuente: elaboración propia en RStudio

Tabla D-3.: Resultados para intención de comportamiento

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Género	1, 47	0.68	.014	.412
Momento	1, 47	15.12 ***	.243	<.001
Género \times Momento	1, 47	0.25	.005	.621
Edad	3, 45	1.60	.096	.203
Momento	1, 45	6.49 *	.126	.014
Edad \times Momento	3, 45	0.35	.023	.791
Cuenca	1, 48	0.83	.017	.366
Momento	1, 48	12.91 ***	.212	<.001
Cuenca \times Momento	1, 48	0.27	.006	.605
Antigüedad	3, 46	1.35	.081	.269
Momento	1, 46	13.44 ***	.226	<.001
Antig. \times Momento	3, 46	0.21	.013	.890
Educación	3, 46	1.70	.100	.180
Momento	1, 46	10.71 **	.189	.002
Edu. \times Momento	3, 46	0.41	.026	.745
Formación Ambiental	1, 48	2.03	.041	.160
Momento	1, 48	23.78 ***	.331	<.001
Form. Amb \times Momento	1, 48	2.44	.048	.125
Ocupación	3, 46	4.37 **	.222	.009
Momento	1, 46	12.14 **	.209	.001

Tabla D-3.: Resultados para intención de comportamiento

Efecto	df	<i>F</i>	Tamaño del efecto (η^2 parcial)	Valor <i>p</i>
Ocup. \times Momento	3, 46	0.65	.040	.590
Sector	10, 37	0.63	.145	.779
Momento	1, 37	5.91 *	.138	.020
Sector \times Momento	10, 37	0.69	.157	.726
Zona	1, 48	2.56	.051	.116
Momento	1, 48	3.11 +	.061	.084
Zona \times Momento	1, 48	0.19	.004	.666
Pertenencia a orgs. ambientales	1, 48	4.15 *	.080	.047
Momento	1, 48	14.47 ***	.232	<.001
Pertenencia \times Momento	1, 48	1.21	.025	.277
Hijos	1, 48	0.49	.010	.488
Momento	1, 48	20.45 ***	.299	<.001
Hijos \times Momento	1, 48	2.73	.054	.105
Experiencia con simulación	1, 48	1.01	.021	.320
Momento	1, 48	20.24 ***	.297	<.001
Exp. Sim \times Momento	1, 48	0.23	.005	.632
Ingresos	4, 43	2.21 +	.171	.084
Momento	1, 43	11.68 **	.214	.001
Ingresos \times Momento	4, 43	1.00	.085	.417

Fuente: elaboración propia en RStudio

E. Anexo: Indicadores de aprendizaje

En las siguientes páginas se muestran los indicadores de aprendizaje usados para la recolección de datos, elaborados a partir del trabajo de Stouten et al. (2012). El primer cuestionario se aplicó luego del *briefing* y antes de jugar con el micromundo. Este incluyó: (i) un consentimiento informado en el cual las personas aceptaban participar voluntariamente en el estudio; (ii) preguntas de datos personales correspondientes a las características descritas en la Tabla **3-1**; y (iii) los ítems de medición del aprendizaje *per se*, que consistieron en una primera parte equivalente al conocimiento subjetivo, la segunda parte a la actitud hacia las decisiones, y la tercera parte a la intención de comportamiento. Finalmente, el segundo cuestionario se aplicó luego de la sesión con el micromundo. Este incluyó las mismas preguntas de los componentes de aprendizaje y, al final, las preguntas abiertas.

Primer cuestionario del micromundo

¡Bienvenido(a)! Este es un breve cuestionario para recopilar información valiosa para mi investigación. Sus respuestas son muy importantes, así que responda con tranquilidad y sinceridad. El cuestionario se divide en dos (2) secciones: en la primera se le pedirán unos datos básicos (anónimos y confidenciales), y en la segunda se le harán unas preguntas relacionadas con el micromundo.

¡Gracias por su participación!

Consentimiento informado

Declaro que he sido informado(a) e invitado(a) a participar en una sesión de prueba piloto del proyecto “**Micromundo de sostenibilidad en cuencas: una herramienta para el análisis de decisiones hacia la sostenibilidad**”, el cual forma parte de una investigación de maestría que cuenta con el respaldo y financiamiento de la Universidad Nacional de Colombia—sede Medellín y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Entiendo que este estudio busca evaluar la incidencia que distintas características de los actores de un sistema socio-ecológico de cuenca tienen sobre el proceso de aprendizaje y sobre la toma de decisiones a través de un micromundo, y sé que mi participación se lleva a cabo en un espacio y horario acordado previamente, e incluye responder este cuestionario que demorará alrededor de 10 minutos.

Me han explicado que la información registrada será confidencial, y que los nombres de los participantes serán asociados a un número de serie, esto significa que las respuestas no podrán ser conocidas por otras personas ni tampoco ser identificadas en la fase de publicación de resultados. Estoy en conocimiento que los datos no me serán entregados y que no habrá retribución por la participación en este estudio. Asimismo, sé que puedo negar la participación o retirarme en cualquier etapa de la investigación, sin expresión de causa ni consecuencias negativas para mí.

Acepto voluntariamente participar en este estudio: Sí ___ No ___

Por favor escriba su código de participante: _____

Datos básicos

- ¿Con qué género se identifica? Masculino ___ Femenino ___ Otro ___
- ¿Cuántos años tiene?
Menos de 28 ___ Entre 46 y 60 ___
Entre 28 y 45 ___ Más de 60 ___
- ¿En qué municipio vive?

- ¿Desde hace cuántos años vive en ese municipio?

Menos de 5 años ___	Entre 10 y 20 años ___
Entre 5 y 10 años ___	Más de 20 años ___
- ¿Cuál es su mayor nivel educativo alcanzado?

Ninguno ___	Técnica o tecnología ___
Primaria ___	Profesional o superior ___
Bachillerato ___	
- ¿Tiene formación (formal o informal) en temas ambientales y de sostenibilidad?
 - *Formal*: cuenta con un título (por ejemplo, ingeniero(a) ambiental)
 - *Informal*: no cuenta con un título, pero ha hecho cursos, diplomados, etc., en esos temas

Sí ___ No ___
- ¿Cuál es su ocupación?

Empleado del sector público ___	Ama(o) de casa ___
Empleado del sector privado ___	Ninguna ___
Independiente/contratista ___	Otro: _____
Estudiante ___	
- Si usted es empleado o independiente, por favor indique el nombre de la empresa o institución donde trabaja (si no es empleado/independiente, deje el espacio en blanco y pase a la siguiente pregunta)

- Si usted es estudiante, por favor indique el programa que está cursando (si no es estudiante, deje el espacio en blanco y pase a la siguiente pregunta)

- ¿Cuál es el sector en que más ha trabajado en los últimos 5 años? Seleccione sólo una opción.

Administración pública (alcaldía, gobernación, UMATA, etc.) ___	Sector comercial ___
Autoridad ambiental ___	Sector industrial ___
Academia (universidades, centros de investigación, etc.) ___	Organización sin ánimo de lucro ___
Ganadería ___	Sector educativo ___
Agricultura ___	Ninguno ___
	Otro. ¿Cuál? _____
- ¿Vive en zona rural o urbana? Rural ___ Urbana ___
- ¿Usted pertenece a alguna organización ambiental (ONG, grupos activistas, etc.)? Sí ___ No ___
- ¿Usted tiene hijo(s)? Sí ___ No ___
- ¿Está familiarizado(a) con juegos de simulación en computadores? Sí ___ No ___
- Aproximadamente, ¿cuáles son sus ingresos mensuales? (el salario mínimo mensual en 2023 es de \$1.160.000)

Menos de 1 salario mínimo ___

Entre 1 y 2 salarios mínimos ___

Entre 2 y 4 salarios mínimos ___

Más de 4 salarios mínimos ___

No percibo ingresos ___

Primera parte

Por favor, seleccione el número que mejor indique qué tan de acuerdo está con los siguientes enunciados:

	Totalmente en desacuerdo		Ni de acuerdo ni en desacuerdo			Totalmente de acuerdo	
Comparado con la mayoría de personas, conozco bastante bien los efectos de distintas decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Entre mis conocidos, soy uno de los expertos para evaluar los efectos de distintas decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Soy consciente de la magnitud que tienen diferentes decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Cuando se trata del impacto de las decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca, se puede decir que soy muy conecedor	1	2	3	4	5	6	7

Segunda parte

En esta sección, usted observará 7 enunciados, cada uno con 4 pares de adjetivos. Por favor, seleccione para cada par de adjetivos el número en la escala que mejor refleje su opinión sobre el enunciado.

Los procesos de educación ambiental son para la sostenibilidad de la cuenca									
Dañinos	1	2	3	4	5	6	7	Benéficos	
Malos	1	2	3	4	5	6	7	Buenos	
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosos	
Injustos	1	2	3	4	5	6	7	Justos	
La inversión en proyectos comunitarios y el apoyo a líderes sociales es para la sostenibilidad de la cuenca									
Dañina	1	2	3	4	5	6	7	Benéfica	
Mala	1	2	3	4	5	6	7	Buena	
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosa	
Injusta	1	2	3	4	5	6	7	Justa	
Las decisiones administrativas por parte de la autoridad ambiental son para la sostenibilidad de la cuenca									
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas	
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas	
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas	
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas	
Las decisiones de diseño de políticas públicas son para la sostenibilidad de la cuenca									
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas	
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas	
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas	
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas	
El programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) es para la sostenibilidad de la cuenca									
Dañino	1	2	3	4	5	6	7	Benéfico	
Malo	1	2	3	4	5	6	7	Bueno	

Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valioso
Injusto	1	2	3	4	5	6	7	Justo
Las decisiones de formas de producción son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas
Las motivaciones de reputación asociadas a ganadería y agricultura son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas

Tercera parte

Por favor, seleccione el número que mejor indique qué tan de acuerdo está con las siguientes afirmaciones:

Si yo fuese el(la) único(a) tomador de decisiones en la cuenca, tengo la intención de como una forma de lograr la sostenibilidad de la cuenca

	Totalmente en desacuerdo		Ni de acuerdo ni en desacuerdo			Totalmente de acuerdo	
	1	2	3	4	5	6	7
...usar los procesos de educación ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar la inversión en proyectos comunitarios y el apoyo a líderes sociales...	1	2	3	4	5	6	7
...usar la disponibilidad de profesionales ambientales en la cuenca...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de mejora continua en la autoridad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de acompañamiento para cumplir la normatividad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar el grado de rendición de cuentas de la autoridad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los espacios de concertación entre diseñadores de políticas...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de fortalecimiento del Consejo de Cuenca...	1	2	3	4	5	6	7
...usar el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA)...	1	2	3	4	5	6	7
...implementar la ganadería alternativa...	1	2	3	4	5	6	7
...implementar prácticas de manejo de cultivos...	1	2	3	4	5	6	7
...usar las motivaciones de reputación asociadas a ganadería y agricultura...	1	2	3	4	5	6	7

FIN DEL CUESTIONARIO

¡Muchas gracias por su tiempo! Sus respuestas son MUY valiosas para mi investigación

Segundo cuestionario del micromundo

¡Bienvenido(a) de nuevo! Este es un cuestionario más corto que el primero, debido a que ya no se le pedirán los datos básicos, sino que pasará directamente a las preguntas relacionadas con el micromundo. **Sus respuestas NO necesariamente tienen que ser iguales a las del primer cuestionario.**

¡Gracias por su participación!

Por favor escriba su código de participante: _____

Primera parte

Por favor, seleccione el número que mejor indique qué tan de acuerdo está con los siguientes enunciados:

	Totalmente en desacuerdo		Ni de acuerdo ni en desacuerdo			Totalmente de acuerdo	
Comparado con la mayoría de personas, conozco bastante bien los efectos de distintas decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Entre mis conocidos, soy uno de los expertos para evaluar los efectos de distintas decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Soy consciente de la magnitud que tienen diferentes decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca	1	2	3	4	5	6	7
Cuando se trata del impacto de las decisiones sobre la sostenibilidad de una cuenca, se puede decir que soy muy conocedor	1	2	3	4	5	6	7

Segunda parte

En esta sección, usted observará 7 enunciados, cada uno con 4 pares de adjetivos. Por favor, seleccione para cada par de adjetivos el número en la escala que mejor refleje su opinión sobre el enunciado.

Los procesos de educación ambiental son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinos	1	2	3	4	5	6	7	Benéficos
Malos	1	2	3	4	5	6	7	Buenos
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosos
Injustos	1	2	3	4	5	6	7	Justos
La inversión en proyectos comunitarios y el apoyo a líderes sociales es para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañina	1	2	3	4	5	6	7	Benéfica
Mala	1	2	3	4	5	6	7	Buena
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosa
Injusta	1	2	3	4	5	6	7	Justa
Las decisiones administrativas por parte de la autoridad ambiental son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas

Las decisiones de diseño de políticas públicas son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas
El programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) es para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañino	1	2	3	4	5	6	7	Benéfico
Malo	1	2	3	4	5	6	7	Bueno
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valioso
Injusto	1	2	3	4	5	6	7	Justo
Las decisiones de formas de producción son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas
Las motivaciones de reputación asociadas a ganadería y agricultura son para la sostenibilidad de la cuenca								
Dañinas	1	2	3	4	5	6	7	Benéficas
Malas	1	2	3	4	5	6	7	Buenas
Sin valor	1	2	3	4	5	6	7	Valiosas
Injustas	1	2	3	4	5	6	7	Justas

Tercera parte

Por favor, seleccione el número que mejor indique qué tan de acuerdo está con las siguientes afirmaciones:

Si yo fuese el(la) único(a) tomador de decisiones en la cuenca, tengo la intención de como una forma de lograr la sostenibilidad de la cuenca

	Totalmente en desacuerdo		Ni de acuerdo ni en desacuerdo			Totalmente de acuerdo	
	1	2	3	4	5	6	7
...usar los procesos de educación ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar la inversión en proyectos comunitarios y el apoyo a líderes sociales...	1	2	3	4	5	6	7
...usar la disponibilidad de profesionales ambientales en la cuenca...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de mejora continua en la autoridad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de acompañamiento para cumplir la normatividad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar el grado de rendición de cuentas de la autoridad ambiental...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los espacios de concertación entre diseñadores de políticas...	1	2	3	4	5	6	7
...usar los programas de fortalecimiento del Consejo de Cuenca...	1	2	3	4	5	6	7
...usar el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA)...	1	2	3	4	5	6	7
...implementar la ganadería alternativa...	1	2	3	4	5	6	7
...implementar prácticas de manejo de cultivos...	1	2	3	4	5	6	7
...usar las motivaciones de reputación asociadas a ganadería y agricultura...	1	2	3	4	5	6	7

(por favor continúe en la siguiente página)

Cuarta parte: preguntas abiertas

- ¿Qué fue lo que **más** le gustó de jugar con el micromundo?

- ¿Qué fue lo que **menos** le gustó de jugar con el micromundo?

- ¿Qué cree que le falta a este juego?

- Si tiene algún comentario adicional, lo puede incluir aquí abajo

FIN DEL CUESTIONARIO

¡Muchas gracias por su tiempo! Sus respuestas son MUY valiosas para mi investigación

F. Anexo: Registro fotográfico de los talleres con el micromundo

Figura F-1.: Subsecretaría de Ambiente, 6/junio/2023



Fuente: elaboración propia

Figura F-2.: Comunidad y representante de Empresas Públicas de La Ceja, 23/junio/2023



Fuente: elaboración propia

Figura F-3.: Autoridad ambiental y academia (programa Piragua de Corantioquia–UdeA, virtual), 27/junio/2023

PRIMERA RONDA Año actual: 2020

Instrumentos educativos

Clic para quitar procesos de educación ambiental

Usted puede decidir si en la cuenca se implementan (switch activado) o no (switch apagado) talleres, conferencias, capacitaciones, cursos, etc., para la educación ambiental de la comunidad, tanto por parte de la autoridad ambiental como de organizaciones ambientalistas.

Se refiere a la proporción de habitantes que participan de estos procesos y si se aplican estrategias pedagógicas (juegos de roles, debates, etc.)

1: baja participación y sin implementar estrategias pedagógicas
2: alta participación, pero sin estrategias pedagógicas
3: alta participación y con estrategias pedagógicas

Efectividad de los procesos de educación

Sobre la comunidad

Inversión en proyectos comunitarios y apoyo a líderes sociales

Es la inversión en forma de medios materiales a proyectos comunitarios con enfoque ambiental, y el apoyo a líderes sociales para aumentar su capacidad de convocatoria.

0: no hay inversión; 1: baja inversión y bajo apoyo a líderes; 2: alta inversión, bajo apoyo a líderes; 3: alta inversión y alto apoyo a líderes

Puntos de prioridad 25

Avanzar 5 años Ver resultados Reiniciar simulación

Powered by see systems, inc.

Sergio Ospino (Invitado)

MR Mate... HP Hidr...
SA Soci... GI Gest...
JM Jorg... GV GEU...
PA Pirag... EO Apoy...

Fuente: elaboración propia

Figura F-4.: Comité Interinstitucional de Educación Ambiental (actores varios), 29/junio/2023



Fuente: elaboración propia

Bibliografía

- Abram, J. J. (2018). An evaluation of structural loop analysis on dynamic models of ecological and socio-ecological systems [University of Southampton].
- Angelstam, P., Andersson, K., Annerstedt, M., Axelsson, R., Elbakidze, M., Garrido, P., Grahn, P., Jönsson, K. I., Pedersen, S., Schlyter, P., Skärbäck, E., Smith, M., & Stjernquist, I. (2013). Solving problems in social-ecological systems: Definition, practice and barriers of transdisciplinary research. *Ambio*, 42(2), 254–265.
- Arango Carvajal, L. I. (2021). Trade offs y sinergias de servicios ecosistémicos potenciales con base en cambios de coberturas vegetales. Universidad Nacional de Colombia.
- Asteria, D., & Herdiansyah, H. (2020). Analysis Sustainability of Women's Leadership for Watershed Conservation in the Urban Area. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development (IJSESD)*, 11(2), 38–50.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210.
- Barrero-Amórtegui, Y., & Maldonado, J. H. (2021). Gender composition of management groups in a conservation agreement framework: Experimental evidence for mangrove use in the Colombian Pacific. *World Development*, 142, 105449.
- Berrio-Giraldo, L. I. (2020). Dinámica de sistemas socio-ecológicos en cuencas hidrográficas de media montaña, Colombia [Universidad Nacional de Colombia].
- Berrio-Giraldo, L., Villegas-Palacio, C., & Arango-Aramburo, S. (2021). Understating complex interactions in socio-ecological systems using system dynamics: A case in the tropical Andes. *Journal of Environmental Management*, 291(April), 112675.
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Botero, V. (2020). Vulnerability of Rural Communities to Change in an Ecosystem Service Provision: Surface water supply. A Case Study in the Northern Andes, Colombia. *Land Use Policy*, 97, 104737.
- Biggs, R., De Vos, A., Preiser, R., Clements, H., Maciejewski, K., & Schlüter, M. (2021). *The Routledge Handbook of Research Methods for Social-Ecological Systems* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003021339>

- Bolaños-Valencia, I., Villegas-Palacio, C., López-Gómez, C. P., Berrouet, L., & Ruiz, A. (2019). Social perception of risk in socio-ecological systems. A qualitative and quantitative analysis. *Ecosystem Services*, 38, 100942. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100942>
- Brehmer, B. (2005). Micro-worlds and the circular relation between people and their environment. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(1), 73–93.
- Builes, S., Congote, D., Villegas-Palacio, C., Berrio-Giraldo, L., & Berrouet, L. (2022). Trajectories of Socio-Ecological Systems: Does Social Capital Matter? A case study in the tropical Andes. *Environmental Development*. [Manuscrito sin publicar]
- Burgos-Ayala, A., Jiménez-Aceituno, A., & Rozas-Vásquez, D. (2022). Lessons learned and challenges for environmental management in Colombia: The role of communication, education and participation strategies. *Journal for Nature Conservation*, 70, 126281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126281>
- Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M., & del Moral Ituarte, L. (2015). River basins as social-ecological systems: linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, 20(3). <https://doi.org/10.5751/ES-07778-200320>
- Carpenter, S. R., Booth, E. G., Gillon, S., Kucharik, C. J., Loheide, S., Mase, A. S., Motew, M., Qiu, J., Rissman, A. R., Seifert, J., Soyly, E., Turner, M., & Wardropper, C. B. (2015). Plausible futures of a social-ecological system. *Ecology and Society*, 20(2). <http://www.jstor.org/stable/26270183>
- Cazan, A.-M., & Schiopca, B.-A. (2014). Self-directed Learning, Personality Traits and Academic Achievement. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 127, 640–644.
- Chamorro-Premuzic, T., & Furnham, A. (2008). Personality, intelligence and approaches to learning as predictors of academic performance. *Personality and Individual Differences*, 44(7), 1596–1603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.paid.2008.01.003>
- Chen, A., & Bell, P. A. (2016). Microworlds: Using Computers to Understand Choices about the Use of Natural Resources. In R. Gifford (Ed.), *Research Methods for Environmental Psychology* (pp. 183–196). John Wiley & Sons, Ltd.
- Climate Interactive. (2023). En-ROADS. <https://www.climateinteractive.org/en-roads/>
- Colding, J., & Barthel, S. (2019). Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 24(1). <https://doi.org/10.5751/ES-10598-240102>
- Congote Osorio, D., & Builes Villegas, S. (2020). Dinámicas del capital social y su incidencia en los servicios ecosistémicos en cuencas hidrográficas. Caso de estudio: Cuenca del Río Grande. Universidad Nacional de Colombia.

-
- CORANTIOQUIA, & UNAL. (2015). Actualización y ajuste Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca de los Ríos Grande y Chico.
- CORNARE. (2016). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Negro: Aprestamiento.
- Cramer, J. S. (2003). *Logit Models from Economics and Other Fields*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511615412>
- Craven, J., Angarita, H., Corzo Perez, G. A., & Vasquez, D. (2017). Development and testing of a river basin management simulation game for integrated management of the Magdalena-Cauca river basin. *Environmental Modelling & Software*, 90, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.002>
- Cumming, G. S., & Peterson, G. D. (2017). Unifying Research on Social–Ecological Resilience and Collapse. *Trends in Ecology & Evolution*, 32(9), 695–713.
- Dabrowski, L. S., Sroda-Murawska, S., Smolinski, P., & Bieganska, J. (2022). Rural-Urban Divide: Generation Z and Pro-Environmental Behaviour. In *Sustainability* (Vol. 14, Issue 23). <https://doi.org/10.3390/su142316111>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J. R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I. A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K. M. A., Figueroa, V. E., Duraiappah, A., Fischer, M., Hill, R., . . . Zlatanova, D. (2015). The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1–16.
- Eisenhart, A. C., Crews Meyer, K. A., King, B., & Young, K. R. (2019). Environmental Perception, Sense of Place, and Residence Time in the Okavango Delta, Botswana. *The Professional Geographer*, 71(1), 109–122. <https://doi.org/10.1080/00330124.2018.1501709>
- Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling and Software*, 93, 127–145.
- España-Guzmán, L. S. (2020). Trayectorias de cobertura vegetal y usos del suelo en la Cuenca de los Ríos Grande-Chico ¿Un problema de la política pública y gobernanza? [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80360>
- Folke, C., Biggs, R., Norström, A. V., Reyers, B., & Rockström, J. (2016). Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecology and Society*, 21(3).

- Francis, J., Eccles, M. P., Johnston, M., Walker, A. E., Grimshaw, J. M., Foy, R., Kaner, E. F. S., Smith, L., & Bonetti, D. (2004). *Constructing questionnaires based on the theory of planned behaviour: A manual for health services researchers*. Centre for Health Services Research, University of Newcastle upon Tyne.
- Franco, C. J., Velásquez, J. D., & Cardona, D. (2012). Micromundo para simular un mercado eléctrico de corto plazo. *Cuadernos de Economía (Colombia)*, 31(58), 229–256.
- Franz, N., Piercy, F., Donaldson, J., Richard, R., & Westbrook, J. (2010). How farmers learn: Implications for agricultural educators. *Journal of Rural Social Sciences*, 25(1), 4. <https://egrove.olemiss.edu/jrss/vol25/iss1/4>
- Frost, J. (2023a). Paired T Test: Definition & When to Use It. *Statistics By Jim: Making Statistics Intuitive*. <https://statisticsbyjim.com/hypothesis-testing/paired-t-test/>
- Frost, J. (2023b). Using Post Hoc Tests with ANOVA. *Statistics By Jim: Making Statistics Intuitive*. <https://statisticsbyjim.com/anova/post-hoc-tests-anova/>
- Gómez-Jaramillo, Y. M. (2023). Sostenibilidad de Sistemas Socioecológicos de cuencas hidrográficas estratégicas en la provisión de servicios ecosistémicos. Caso de estudio: Cuenca de Río Grande. Universidad de Antioquia.
- Graham, A. K., Morecroft, J. D. W., Senge, P. M., & Sterman, J. D. (1992). Model-supported case studies for management education. *European Journal of Operational Research*, 59(1), 151–166. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90012-X)
- Grigg, N. S. (2016). Watersheds as Social-Ecological Systems. In N. S. Grigg (Ed.), *Integrated Water Resource Management: An Interdisciplinary Approach* (pp. 139-149). Palgrave Macmillan UK.
- Grössler, A. (2001, January 1). Musings about the effectiveness and evaluation of business simulators. *Proceedings of the 19th International Conference of the System Dynamics Society*.
- Gupta, N. (2014). Rethinking the relationship between gender and technology: a study of the Indian example. *Work, Employment and Society*, 29(4), 661–672.
- Guyll, M., Spoth, R., & Redmond, C. (2003). The Effects of Incentives and Research Requirements on Participation Rates for a Community-Based Preventive Intervention Research Study. *Journal of Primary Prevention*, 24(1), 25–41.
- Holzer, J. M., Adamescu, C. M., Cazacu, C., Díaz-Delgado, R., Dick, J., Méndez, P. F., Santamaría, L., & Orenstein, D. E. (2019). Evaluating transdisciplinary science to open research-implementation spaces in European social-ecological systems. *Biological Conservation*, 238(August), 108228. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108228>

-
- Hsu, H., & Lachenbruch, P. A. (2014). Paired t Test. In Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat05929>
- Huber, L., & Watson, C. (2014). Technology: Education and Training Needs of Older Adults. *Educational Gerontology*, 40(1), 16–25.
- isee systems. (n.d.). Checking Unit Consistency. Resources. Retrieved January 1, 2023, from <https://www.iseesystems.com/resources/help/v2-1/Default>
- isee systems. (2023). Stella Architect. About. <https://www.iseesystems.com/store/products/>
- Ito, H., & Kawazoe, N. (2018). The associations between socio-demographic factors and environmental knowledge in the city of Toyota, Japan. *Applied Environmental Education & Communication*, 17(3), 215–228. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2017.1395718>
- Janmaimool, P., & Khajohnmanee, S. (2019). Roles of Environmental System Knowledge in Promoting University Students' Environmental Attitudes and Pro-Environmental Behaviors. In *Sustainability* (Vol. 11, Issue 16). <https://doi.org/10.3390/su11164270>
- Kelly, R. A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., ElSawah, S., Hamilton, S. H., Henriksen, H. J., Kuikka, S., Maier, H. R., Rizzoli, A. E., van Delden, H., & Voinov, A. A. (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling and Software*, 47, 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Kim, D. (2018). Management Flight Simulators: Flight Training for Managers (Part I). The Systems Thinker. <https://thesystemsthinker.com/management-flight-simulators-flight-training-for-managers-part-i/>
- Koontz, T. M., Gupta, D., Mudliar, P., & Ranjan, P. (2015). Adaptive institutions in social-ecological systems governance: A synthesis framework. *Environmental Science & Policy*, 53, 139–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.01.003>
- Levin, S., Xepapadeas, T., Crépin, A.-S., Norberg, J., de Zeeuw, A., Folke, C., Hughes, T., Arrow, K., Barrett, S., Daily, G., Ehrlich, P., Kautsky, N., Mäler, K.-G., Polasky, S., Troell, M., Vincent, J. R., & Walker, B. (2013). Social-ecological systems as complex adaptive systems: modeling and policy implications. *Environment and Development Economics*, 18(2), 111–132. <https://doi.org/10.1017/S1355770X12000460>
- Lieb, L. C. (2022). Occupation and environmental sustainability: A scoping review. *Journal of Occupational Science*, 29(4), 505–528. <https://doi.org/10.1080/14427591.2020.1830840>
- Longhofer, W., Schofer, E., Miric, N., & Frank, D. J. (2016). NGOs, INGOs, and Environmental Policy Reform, 1970–2010. *Social Forces*, 94(4), 1743–1768.

- Machado, J., Villegas-Palacio, C., Loaiza, J. C., & Castañeda, D. A. (2019). Soil natural capital vulnerability to environmental change. A regional scale approach for tropical soils in the Colombian Andes. *Ecological Indicators*, 96(65), 116–126.
- Marrero-Trujillo, V. (2020). A microworld for learning about the diffusion of non-conventional renewable electricity generation technologies in Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Marsiglia Rivera, S. M. (2017). Capacidad adaptativa de los sistemas sociales ante la pérdida o deterioro de los servicios ecosistémicos. 97.
- Martínez-Fernández, J., Banos-González, I., & Esteve-Selma, M. Á. (2021). An integral approach to address socio-ecological systems sustainability and their uncertainties. *Science of the Total Environment*, 762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144457>
- Masterson, V. A., Stedman, R. C., Enqvist, J., Tengö, M., Giusti, M., Wahl, D., & Svedin, U. (2017). The contribution of sense of place to social-ecological systems research. *Ecology and Society*, 22(1). <http://www.jstor.org/stable/26270120>
- Milfont, T. L., & Sibley, C. G. (2011). Exploring the concept of environmental generativity. *International Journal of Hispanic Psychology*, 4(1), 21.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press.
- Miller, C. S., Lehman, J. F., & Koedinger, K. R. (1999). Goals and Learning in Microworlds. *Cognitive Science*, 23(3), 305-336.
- Decreto 1076 de 2015, (2015) (testimony of Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).
- MIT Sloan School of Management. (2022). Management Simulations. Teaching Resources Library. <https://mitsloan.mit.edu/teaching-resources-library/management-simulations>
- Mohammed, S., Alsafadi, K., Talukdar, S., Kiwan, S., Hennawi, S., Alshihabi, O., Sharaf, M., & Harsanyie, E. (2020). Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100375. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100375>
- Morandín-Ahuerma, I., Contreras-Hernández, A., Ayala-Ortiz, D. A., & Pérez-Maqueo, O. (2019). Socio-Ecosystemic Sustainability. In *Sustainability* (Vol. 11, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/su11123354>
- Murrar, S., & Brauer, M. (2018). Mixed Model Analysis of Variance. In *The SAGE Encyclopedia of Educational Research, Measurement, and Evaluation*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781506326139 NV - 4>

-
- Nauzeer, S., & Jaunky, V. C. (2021). A meta-analysis of the combined effects of motivation, learning and personality traits on academic performance. *Pedagogical Research*, 6(3). <https://doi.org/10.29333/pr/10963>
- Neely, K. (2019). Systems thinking and transdisciplinarity in WASH. In *Systems thinking and WASH: tools and case studies for a sustainable water supply* (Vol. 17, Issue 4).
- Nemoto, T., & Beglar, D. (2014). Developing Likert-Scale Questionnaires. *JALT2013 Conference Proceedings*, 8. <https://jalt-publications.org/proceedings/articles/3972-selected-paper-developing-likert-scale-questionnaires>
- Neumayer, E. (2013). Introduction and Overview. In *Weak versus strong sustainability: Exploring the limits of two opposing paradigms*. Edward Elgar Publishing.
- Nguyen, H. H., Dargusch, P., Moss, P., & Aziz, A. A. (2017). Land-use change and socio-ecological drivers of wetland conversion in Ha Tien Plain, Mekong Delta, Vietnam. *Land Use Policy*, 64, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.019>
- Nordström, J., Shogren, J. F., & Thunström, L. (2020). Do parents counter-balance the carbon emissions of their children? *PLOS ONE*, 15(4), e0231105.
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 362(May), 419–422.
- Papadopoulos, Y., & Tegos, S. (2012). Using Microworlds to Introduce Programming to Novices. *2012 16th Panhellenic Conference on Informatics*, 180–185.
- Papert, S. (1980). *Mindstorms: children, computers, and powerful ideas*. Basic Books.
- Piscitelli, A., & D’Uggento, A. M. (2022). Do young people really engage in sustainable behaviors in their lifestyles? *Social Indicators Research*, 163(3), 1467–1485.
- Popa, F., Guillermin, M., & Dedeurwaerdere, T. (2015). A pragmatist approach to transdisciplinarity in sustainability research: From complex systems theory to reflexive science. *Futures*, 65, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.02.002>
- Quadrat-Ullah, H. (2012). On the validation of system dynamics type simulation models. *Telecommunication Systems*, 51(2), 159–166. <https://doi.org/10.1007/s11235-011-9425-4>
- Reilly, D., Neumann, D. L., & Andrews, G. (2022). Gender Differences in Self-Estimated Intelligence: Exploring the Male Hubris, Female Humility Problem . In *Frontiers in Psychology* (Vol. 13). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.812483>
- Richardson, J. T. E. (2011). Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educational Research Review*, 6(2), 135–147.

- Román-Botero, R., Gómez-Giraldo, A., & Toro-Botero, M. (2010). Importancia del ciclo diario de la temperatura de los afluentes en la estructura térmica de embalses tropicales. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Romero-Rodríguez, J.-M., Ramírez-Montoya, M.-S., Aznar-Díaz, I., & Hinojo-Lucena, F.-J. (2020). Social Appropriation of Knowledge as a Key Factor for Local Development and Open Innovation: A Systematic Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(2), 44. <https://doi.org/10.3390/joitmc6020044>
- Romme, A. G. L. (2003). Learning Outcomes of Microworlds for Management Education. *Management Learning*, 34(1), 51–61. <https://doi.org/10.1177/135050760304001130>
- Schlüter, M., Müller, B., & Frank, K. (2019). The potential of models and modeling for social-ecological systems research: The reference frame ModSES. *Ecology and Society*, 24(1). <https://doi.org/10.5751/ES-10716-240131>
- Schwaninger, M., & Groesser, S. (2020). System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance BT - System Dynamics: Theory and Applications (B. Dangerfield (ed.); pp. 119–138). Springer US.
- Senge, P. M. (1994). *The Fifth Discipline Fieldbook: Strategies and Tools for Building a Learning Organization*. Currency, Doubleday.
- Smetschka, B., & Gaube, V. (2020). Co-creating formalized models: Participatory modelling as method and process in transdisciplinary research and its impact potentials. *Environmental Science & Policy*, 103, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.005>
- South, L., Saffo, D., Vitek, O., Dunne, C., & Borkin, M. A. (2022). Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review. *Computer Graphics Forum*, 41(3), 43–55. <https://doi.org/10.1111/cgf.14521>
- Steger, C., Hirsch, S., Cosgrove, C., Inman, S., Nost, E., Shinbrot, X., Thorn, J. P. R., Brown, D. G., Grêt-Regamey, A., Müller, B., Reid, R. S., Tucker, C., Weibel, B., & Klein, J. A. (2021). Linking model design and application for transdisciplinary approaches in social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 66(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102201>
- Sterk, M., van de Leemput, I. A., & Peeters, E. T. H. M. (2017). How to conceptualize and operationalize resilience in socio-ecological systems? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.09.003>
- Sterman, J. (1989). Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science*, 35(3), 321–339.

-
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Sterman, J. (2014). Interactive web-based simulations for strategy and sustainability: The MIT Sloan LearningEdge management flight simulators, Part I. *System Dynamics Review*, 30(1–2), 89–121. <https://doi.org/10.1002/sdr.1513>
- Sterman, J., Fiddaman, T., Franck, T., Jones, A., McCauley, S., Rice, P., Sawin, E., & Siegel, L. (2013). Management flight simulators to support climate negotiations. *Environmental Modelling and Software*, 44, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.004>
- Stouten, H., Heene, A., Gellynck, X., & Polet, H. (2012). Learning from playing with micro-worlds in policy making: An experimental evaluation in fisheries management. *Computers in Human Behavior*, 28(2), 757–770. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.12.002>
- Stouten, Hendrik, Polet, H., Heene, A., & Gellynck, X. (2017). Learning from Collaboratively Playing with Simulation Models in Policy Making: An Experimental Evaluation in Fisheries Management. *Systems Research and Behavioral Science*, 34(4), 403–413. <https://doi.org/10.1002/sres.2464>
- Sullivan, G. M., & Artino Jr., A. R. (2013). Analyzing and Interpreting Data From Likert-Type Scales. *Journal of Graduate Medical Education*, 5(4), 541–542.
- Swanson, D. A. (2015). On the Relationship among Values of the same Summary Measure of Error when used across Multiple Characteristics at the same point in time: An Examination of MALPE and MAPE. *Review of Economics and Finance*, 5(1). <https://escholarship.org/uc/item/1f71t3x9>
- Sweeney, L. B., & Sterman, J. D. (2000). Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review*, 16(4), 249–286. <https://doi.org/10.1002/sdr.198>
- System Dynamics Society. (n.d.). Core System Dynamics Modeling Software. Retrieved April 7, 2023, from <https://systemdynamics.org/tools/core-software/>
- Taherdoost, H. (2016). Sampling Methods in Research Methodology; How to Choose a Sampling Technique for Research. *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)*, 5. <https://hal.science/hal-02546796>
- Thomas, G. O., Fisher, R., Whitmarsh, L., Milfont, T. L., & Poortinga, W. (2018). The impact of parenthood on environmental attitudes and behaviour: a longitudinal investigation of the legacy hypothesis. *Population and Environment*, 39(3), 261–276. <https://doi.org/10.1007/s11111-017-0291-1>

- van de Wetering, J., Leijten, P., Spitzer, J., & Thomaes, S. (2022). Does environmental education benefit environmental outcomes in children and adolescents? A meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, 81, 101782.
- Vélez Upegui, J. I. (2001). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. Universitat Politècnica de València.
- Ventana Systems Inc. (2015). What are Management Flight Simulators, or Learning Environments? <https://vensim.com/faqs/what-are-management-flight-simulators-or-learning-environments/>
- Wals, A. E. J., & Benavot, A. (2017). Can we meet the sustainability challenges? The role of education and lifelong learning. *European Journal of Education*, 52(4), 404–413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejed.12250>
- Warren, K., & Langley, P. (1999). The effective communication of system dynamics to improve insight and learning in management education. *Journal of the Operational Research Society*, 50(4), 396–404. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600679>
- Wolbring, G., & Gill, S. (2023). Potential Impact of Environmental Activism: A Survey and a Scoping Review. In *Sustainability* (Vol. 15, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/su15042962>