

Universidad Miguel Hernández de Elche

Facultad de ciencias experimentales de Elche

Grado de ciencias ambientales



Trabajo Fin de Grado

Curso académico 2022-2023

Título

Herramientas de simulación para apoyar procesos de toma de decisión:
fortaleciendo la resiliencia de agroecosistemas tradicionales de zonas
áridas frente al cambio climático

Alumno: Mario López Fernández

Tutor: Andrés Giménez Casalduero

Cotutores: Alicia Tenza Peral, Irene Pérez Ibarra

Índice

Resumen.....	3
Introducción	4
Antecedentes.....	7
Objetivos.....	12
Materiales y métodos	13
Adecuación del modelo SESSMO.....	13
Diseño de la herramienta de simulación interactiva	15
Diseño de la guía para implementar la herramienta de simulación interactiva en talleres participativos.....	16
Resultados	17
Demostración de la herramienta de simulación.....	24
Guía para implementar la herramienta de simulación interactiva en talleres participativos.....	29
Discusión.....	34
Conclusiones	36
Bibliografía.....	37

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es mejorar la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones de gestión de los ecosistemas utilizando las herramientas de simulación como apoyo. En los últimos siglos nuestros sistemas socio-económicos y su modelo de producción-consumo se ha globalizado. Esta situación exige la reconciliación entre ciencias sociales y naturales y nuevos marcos de análisis, entre ellos el marco de los SSE (sistemas socio-ecológicos). La naturaleza compleja de estos sistemas dificulta la participación de las poblaciones rurales en la toma de decisiones. Para darle a las poblaciones rurales mayor protagonismo en la toma de decisiones, este trabajo modifica e implementa un modelo de simulación dinámica como herramienta de aprendizaje usados en talleres participativos.

Palabras clave: sistema socio-ecológico, resiliencia, simulación dinámica, estrategia de gestión, escenario climático.



Abstract

The main objective of this work is to improve citizen participation in ecosystem management decision-making processes using simulation tools as a support. In the last centuries, our socio-economic systems and their production-consumption model have become globalized. This situation calls for reconciliation between social and natural sciences and new frameworks of analysis including the SES (social-ecological systems) framework. These more complex systems make it difficult for rural populations to participate in decision making. In order to give rural populations a greater role in decision making, this work has thought of modifying and implementing dynamic simulation systems as a learning tool used in participatory workshops.

Key words: social-ecological system, resilience, dynamic simulation, management strategy, climate scenario.

Introducción

Las zonas áridas son importantes para la sostenibilidad global y la seguridad alimentaria. Ocupan un 40% de la superficie terrestre, suponen el 44% de las tierras cultivadas, concentran el 50% de ganado a nivel mundial, y son el sustento principal para más de 2.000 millones de personas (IFAD 2016). Los agroecosistemas tradicionales de las zonas áridas están altamente adaptados a la variabilidad espaciotemporal de los recursos naturales, así como a perturbaciones y cambios frecuentes en su historia (p.ej., sequías). Sin embargo, en las últimas décadas se ha evidenciado la existencia de un proceso de cambio global que compromete la capacidad adaptativa de estos agroecosistemas. Tal proceso ha sido causado por el extenso y acelerado uso de los recursos naturales del planeta por la sociedad global en los últimos 70 años (Steffen et al. 2011, IPCC 2019, IPBES 2020); aunado con la creciente contaminación e hiperconectividad global. Este cambio acelerado a escala global está desestabilizando los procesos de regulación clave de nuestro planeta (Röckstrom et al. 2009). Entre las consecuencias del cambio global encontramos el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, y el incremento en la frecuencia de perturbaciones (IPCC 2019, IPBES 2020). Los efectos del cambio climático, por un lado, amenazan a los agroecosistemas tradicionales de regiones áridas al aumentar la mortalidad del ganado, reducir su producción y reproducción, y disminuir la cantidad y calidad de forrajes y agua de los que dependen (Rojas-Downing et al., 2017). Por otro lado, los cambios socioeconómicos relacionados con el fenómeno de la globalización y el auge y expansión del neoliberalismo empujan a estos sistemas en direcciones opuestas, pero igualmente perjudiciales tanto para la salud humana como para los ecosistemas, con la intensificación en el uso de los recursos naturales y de la carga ganadera bajo esquemas agroindustriales (FAO 1996, Aguilera et al. 2020), y el declive y desaparición de los sistemas extensivos a causa principalmente del despoblamiento rural, el envejecimiento poblacional y la ausencia de recambio generacional (Collantes 2003).

Los agroecosistemas son un ejemplo de lo que se conoce como sistemas socioecológicos (SSE). Este concepto pretende enfatizar la interrelación del ser humano con la naturaleza, cuyos límites entre componentes sociales y ecológicos son difusos (Berkes y Folke 1998, Miralles, 2019). El SSE comprende: i) la base de

recursos naturales (componentes geofísicos y biológicos), que tienen sus propias dinámicas, y que proveen de servicios ecosistémicos a la población humana; ii) las instituciones creadas para aprovechar los recursos, distribuir los beneficios de su aprovechamiento, y adaptarse a la disponibilidad de los mismos; y iii) la población humana que se organiza en torno a estas instituciones y se abastece de los recursos naturales.

Entender el funcionamiento y las amenazas a las que se enfrentan estos SSE tradicionales, como el cambio climático, es clave para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Para afrontar estos problemas hay que estudiar una propiedad clave de la dinámica de los SSE, la resiliencia. La resiliencia de un sistema se refiere de manera genérica a su capacidad de mantener su estructura y funcionamiento frente a perturbaciones. En cuanto a su estructura y funcionamiento, esto puede referirse tanto variables sociales (educación, desarrollo), económicas (flujo de capitales, ingresos per cápita) como ambientales (biodiversidad, producción de alimentos).

El término resiliencia fue originalmente introducido en ecología por Holling (1973) como un concepto para comprender la capacidad de un ecosistema, con atractores alternativos (p.ej. lago cristalino vs lago eutrofizado), de persistir dentro de un estado cuando es sometido a perturbaciones. Sin embargo, este concepto ha evolucionado con el tiempo y se ha enriquecido (Meuwissen et al. 2019, Walker 2020), de modo que cuando se habla de la resiliencia de un SSE esta capacidad abarca tres grandes propiedades: i) la robustez, entendiendo esta como la capacidad de resistir y recuperarse frente a una perturbación sin modificar su estructura y funcionamiento; ii) su adaptabilidad o capacidad de adaptación, es la capacidad del sistema socioecológico de ser flexible para ajustarse y cambiar según las circunstancias. Si algo no funciona bien, el sistema encuentra modos alternativos de funcionar correctamente. Esta propiedad implica aprendizaje, innovación y anticipación, pero tampoco supone un cambio ni en la estructura ni en el funcionamiento del sistema como tal. Y por último, iii) su transformabilidad o capacidad de transformación, la cual sí supone un cambio ordenado de la estructura y funcionamiento del sistema con tal de persistir en un estado deseado, cuando las condiciones de origen no son sostenibles.

El estudio de la resiliencia de un SSE requiere de enfoques multidisciplinares y sistémicos, ya que son sistemas que incluyen aspectos sociales, económicos y ecológicos que interactúan a diferentes escalas espaciales (de lo global a lo local y viceversa) y a lo largo del tiempo. Para ello, una opción es el uso del enfoque teórico y metodológico de la Dinámica de Sistemas que se centra en la estructura de sistemas complejos y su comportamiento. La complejidad surge de las relaciones no lineales entre los componentes del sistema, retroalimentaciones y retrasos materiales o de información. Los modelos de simulación dinámica son "causal-descriptivos" o de "caja blanca", lo que significa que describen explícitamente las relaciones entre los componentes del sistema (Vennix 1996). Estos modelos se usan para comprender y resolver problemas del mundo real y entre sus ventajas destacan: su transparencia (se describen todas las interacciones mediante ecuaciones diferenciales que permiten la revisión de las estructurales); la amplia gama de fuentes de información que pueden utilizarse para construirlos, calibrarlos y validarlos (por ejemplo, datos empíricos, datos estadísticos, datos cualitativos); y su flexibilidad, que permite abordar problemas complejos inviables para los modelos analíticos, especialmente cuando los datos son escasos (Tenza-Peral et al. 2020). Para elaborar estos modelos se recurre a softwares especiales que permiten construir modelos de simulación dinámica que tienen el inconveniente de ser herramientas especializadas creadas por la comunidad científica para la comunidad científica, lo que limita su aplicabilidad o los aprendizajes que se puedan derivar de estos por su alta barrera de entrada.

Transformar estas herramientas para facilitar el acceso a los resultados de este tipo de modelos por parte del público en general de una manera interactiva puede mejorar sustancialmente la transferencia de conocimiento desde la investigación científica para apoyar procesos de toma de decisión. En la literatura científica se encuentran herramientas "estilizadas" que abordan la complejidad de los sistemas socioecológicos de una manera atractiva, fácil de usar y educativa, como los juegos (por ejemplo, juegos de rol o juegos de mesa) o modelos computacionales (por ejemplo, modelos basados en agentes). Estas herramientas interactivas han demostrado ser útiles para aprender sobre procesos socioecológicos complejos (García-Barrios et al. 2017, Braasch et al. 2018), y proporcionar un "espacio seguro"

para explorar y visualizar los efectos de las decisiones en la vida real (Speelman et al. 2014, García-Barrios et al. 2015, Meinzen-Dick et al. 2016, Braasch et al. 2018).

La investigación pedagógica sobre la eficacia de la enseñanza ha descubierto que la difusión pasiva de hechos no estimula una comprensión profunda del problema y un aprendizaje permanente. En su lugar, se necesitan actividades de aprendizaje más activas y colaborativas, como los juegos educativos, que estimulan una comprensión más profunda del material como se ha podido observar experimentalmente, valga como ejemplo el documentado por Meinzen-Dick y colaboradores (2018).desarrollado en la India que parece haber tenido una repercusión real en promover la mejora de la gestión de agua.

En el presente trabajo, haciendo uso de un modelo de simulación dinámica ya existente sobre un agroecosistema tradicional del desierto sonoreense en México, hemos desarrollado una herramienta interactiva de simulación para que el público general, y específicamente los actores locales de agroecosistemas tradicionales de regiones áridas, puedan explorar y aprender sobre los efectos potenciales del cambio climático, qué es la resiliencia y sus propiedades clave de robustez, adaptación y transformación, y cómo fortalecerlas. Para ello, hemos diseñado la dinámica de un taller participativo que se podrá implementar en agroecosistemas tradicionales de regiones áridas para que los actores locales experimenten de primera mano a través de ejercicios de simulación el efecto de diferentes estrategias de gestión encaminadas a fortalecer la resiliencia de este tipo de agroecosistemas. El propósito de usar esta herramienta interactiva en talleres participativos es mejorar la comprensión sobre la complejidad de los SSE,y fortalecer la resiliencia de estos sistemas frente al cambio climático, proporcionando un apoyo a los procesos de toma de decisión en materia de gestión y desarrollo.

Antecedentes

Este trabajo es la continuación de una investigación a largo plazo desarrollada por investigadores del Área de Ecología de la Universidad Miguel Hernández en colaboración con universidades y centros de investigación de México, España y Estados Unidos. Esta investigación, que se inició en 2008, tenía como objetivo general evaluar la sostenibilidad y promover la revalorización y conservación de los oasis de Baja California Sur (BCS), México, como agroecosistemas tradicionales

clave del desierto sonorense, los cuales jugaron un papel crítico para el establecimiento de poblaciones humanas sedentarias en esta región, así como para su desarrollo cultural y económico. Esta investigación se centró en un oasis en concreto, el oasis de Comondú (Fig. 1), como caso de estudio piloto, el cual se seleccionó por ser uno de los más grandes y mejor conservados de BCS (Cariño et al. 2013). Este oasis se ubica en la parte media de la Sierra La Giganta, dentro del municipio de Comondú.

Este oasis fue antaño capital de municipio, y hasta principios del siglo XX era uno de los principales proveedores de materias primas a los núcleos urbanos de BCS, e incluso hacia otros puntos de México como Sinaloa y Jalisco. A diferencia de otros oasis, como los costeros (p.ej. San José del Cabo), este oasis ha permanecido al margen de inversiones para el desarrollo de complejos turísticos y residencias secundarias. Hasta el año 2011, el oasis de Comondú estaba pobremente conectado con la carretera transpeninsular que une los núcleos urbanos más importantes del estado, lo que influye enormemente en la economía y dinámica poblacional de las áreas rurales (Collantes, 2007). Quizá uno de los frutos de ese aislamiento haya sido la buena conservación de la parte ecológica de este SSE tradicional basado en la agricultura de regadío y la ganadería extensiva. Sin embargo, el fuerte éxodo rural que ha vivido en los últimos 70 años, el deterioro de su tejido social, y la desaparición de instituciones locales de gestión de recursos naturales (p.ej. juntas de riego), han puesto en peligro la perdurabilidad de este agroecosistema tradicional (Tenza et al. 2017).

El objetivo concreto de esta investigación a largo plazo era, a través de un enfoque multidisciplinar y sistémico, comprender cuáles habían sido las causas estructurales responsables del declive de este agroecosistema tradicional tomado como caso de referencia, y con base en este conocimiento, evaluar qué medidas de gestión podrían contribuir de manera más eficiente a mejorar su sostenibilidad y fortalecer su resiliencia frente al cambio global.

A través de un extenso trabajo de campo desarrollado entre 2010-2012, el cual incluyó la realización de un inventario de los usos del suelo, la recopilación de estadísticas históricas (p.ej. censos de población, censos agrarios, datos climáticos), investigación etnográfica (observación participante), y entrevistas en profundidad con los habitantes del oasis de Comondú (Tenza et al. 2017), se construyó un modelo de

simulación dinámica capaz de simular el comportamiento histórico de este sistema socioecológico desde 1940 a 2010 (Tenza et al. 2019).

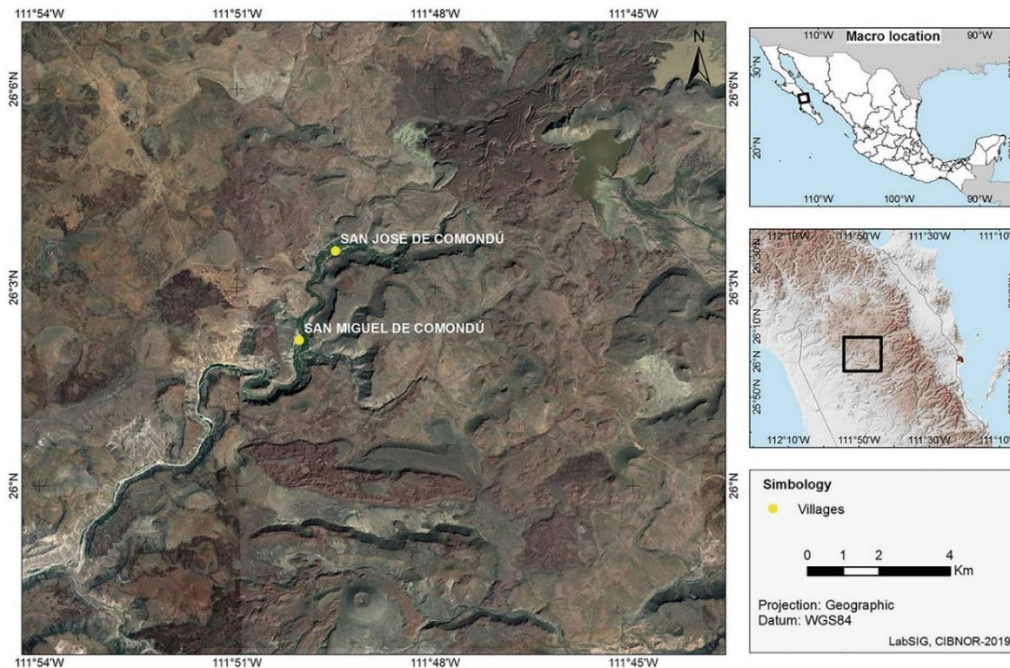


Fig. 1: mapa de la zona de estudio oasis de Comondú en Baja California Sur (México).

Se utilizó el programa informático Vensim DSS 6.4 para desarrollar el modelo de simulación SESSMO (“Modelo para la evaluación de Sostenibilidad de Sistemas Socioecológicos” por sus siglas en inglés). El modelo, consta de tres grandes subsistemas: el subsistema sociodemográfico y de bienestar, el agrícola, y el ganadero (Fig. 2) y contiene un total de cinco variables de estado o nivel: población humana, superficie de regadío, número de ranchos ocupados, ganado bovino, y ganado caprino.

Para la obtención de datos para el modelo SESSMO se usaron cinco fuentes de información: fuentes literarias (publicaciones sobre el oasis de BCS), conocimiento de expertos (equipo interdisciplinario de investigadores), trabajo de campo, datos estadísticos oficiales de agencias gubernamentales, y el conocimiento ecológico local (obtenido a través de 52 entrevistas en profundidad a habitantes locales). De esa toma de información se definieron un total de 39 parámetros en el modelo de los cuales el 62% provienen de los datos de las entrevistas con los pobladores locales, el 23% se extrajo de los datos estadísticos oficiales y el resto, que están relacionados con retrasos temporales y factores de ponderación, se definieron

mediante la herramienta de calibración automática de Vensim, que selecciona el valor óptimo que mejora la calibración con los datos observados disponibles.



Fig. 2 Diagrama conceptual del sistema socioecológico del oasis de Comondú que relaciona temas sociodemográfico, agrícola y ganadero.

El modelo tiene 12 variables externas que incluyen datos reales de salario mínimo, precipitaciones anuales, precios de mercado, huracanes, y servicios públicos, entre otros, para esta zona durante el periodo de estudio. Con el modelo SESSMO operativo y validado formalmente (Tenza et al. 2019), en 2015 se realizó una revisión de publicaciones científicas sobre el oasis de Comondú, los planes de desarrollo sostenible del gobierno regional de BCS, y se realizaron dos talleres participativos con la población local del oasis para identificar propuestas de gestión. Se identificaron un total de 111 propuestas (Tenza-Peral et al. 2022), que por afinidad y convergencia se agruparon en diez grandes medidas de gestión modelables (Tabla 1).

Para la simulación de escenarios en el contexto de la resiliencia de SSE, las diez medidas de gestión se agruparon en cuatro estrategias de gestión dirigidas a: i) fortalecer la robustez, ii) mejorar la capacidad de adaptación, iii) fomentar la transformación local, y iv) fomentar la transformación por agentes externos.

Tabla 1. Listado y descripción de medidas de gestión modelables.

Estrategia de gestión	Medida de gestión	Descripción
Fortalecer la robustez	Programa de empleo Temporal	El gobierno regional pone en marcha un programa periódico de creación de empleo. Se crean 60 empleos durante un mes para limpiar canales de riego y huertas del oasis.
	Aumentar inversión en servicios públicos	El gobierno regional invierte en servicios públicos en el oasis atendiendo la demanda de la población local en los talleres participativos (p.ej. disponibilidad de ambulancia, acceso a bachillerato a distancia).
	Mejorar rendimiento productivo ganadería	Mediante asistencia técnica y veterinaria, y tecnologías de bajo coste se consigue mejorar la salud del ganado, el manejo de la reproducción y la genética del hato ganadero. Con estas mejoras aumenta la tasa de natalidad de las cabras (+35%) y de las vacas (+13%), la producción de queso por cabra (+6.5%), y el peso de los terneros en el momento de la venta (+26%).
	Mejorar rendimiento productivo agricultura	Bajo un enfoque agroecológico se mejora el manejo de suelos y cultivos y se consigue incrementar el rendimiento agrícola en un 80%.
	Apoyo directo a ganadería en sequías	El gobierno regional pone en marcha ayudas directas para promover la pronta recuperación de la ganadería en periodos de sequía severos. Los ganaderos reciben 30 cabras y/o 5 vacas como compensación por la pérdida de animales.
Mejorar la capacidad de adaptación	Aumentar el valor añadido de la producción agrícola	Se crean nuevos canales de comercialización para los productos agrícolas que, mediante un etiquetado de calidad e identidad regional, consiguen aumentar los precios percibidos por las familias agricultoras en un 100%.
	Aumentar el valor añadido de la producción ganadera	Se crean nuevos canales de comercialización para los productos ganaderos que, mediante un etiquetado de calidad e identidad regional, consiguen aumentar los precios percibidos por las familias ganaderas en un 150%.
	Almacenamiento de forraje para sequías	Las familias ganaderas incorporan la innovación de recolectar y almacenar forraje para los periodos de sequía. Esta práctica innovadora para esta zona reduce la mortalidad del ganado en periodos de sequía en un 20%.
Fomentar la transformación local	Desarrollo turístico local	La población local emprende el desarrollo turístico. La capacidad de alojamiento se incrementa gradualmente. La ocupación hotelera anual es del 30%. El beneficio neto de la actividad turística es reinvertido en la economía local (sólo se descuenta el coste de la mano de obra contratada).
Fomentar la transformación	Desarrollo turístico por	Se desarrolla el sector turístico por agentes externos al oasis (p. ej. empresarios o empresas hoteleras). En

(por agentes externos)	agentes externos	este caso, la mayor parte del beneficio de la actividad turística no es reinvertido en la economía local, sólo entran los ingresos procedentes de la mano de obra contratada en el sector.
------------------------	------------------	--

Las estrategias de gestión se pueden combinar, a excepción de la transformación local y por agentes externos, estas estrategias no son compatibles entre sí y no pueden simularse a la misma vez (Tenza-Peral et al. *Manuscrito en Preparación*).

El modelo SESSMO permite explorar los efectos de diferentes estrategias de gestión a largo plazo bajo la incertidumbre del cambio climático (Tenza-Peral et al. *Manuscrito en Preparación*). Para evaluar las estrategias de gestión bajo escenarios de cambio climático, se descargaron las proyecciones de precipitación anual para el año 2050 para la región del oasis de Comondú de la base de datos Worldclim (<https://www.worldclim.org/>), y se construyeron dos escenarios climáticos utilizando los datos de estas proyecciones y los datos de máximos y mínimos y desviación típica de la serie histórica temporal (1939-2016): i) un escenario climático favorable, bajo el cual, la precipitación media anual se incrementa en un 24% respecto al periodo de referencia (1980-2016); y ii) un escenario climático desfavorable en el que la precipitación media anual se reduce en un 40% respecto al periodo de referencia (1980-2016). La tendencia real de los últimos 30 años es hacia el incremento en la precipitación media anual. Desde 1980 a 2016, la precipitación media anual ha aumentado en la región en un 42% respecto al periodo histórico comprendido entre 1940-1979 (Tenza-Peral et al. *Manuscrito en Preparación*).

Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en contribuir a la transferencia de conocimiento desde la investigación científica a la sociedad para promover de manera general el aprendizaje social del concepto de resiliencia aplicado al cambio climático mediante la puesta a punto de una versión del modelo SESSMO que apoye los procesos de toma de decisión sobre gestión y desarrollo en agroecosistemas tradicionales de zonas áridas.

Los objetivos específicos son dos:

- Desarrollar una herramienta interactiva de simulación a partir de un modelo de simulación complejo existente.
- Diseñar una guía para usar/aplicar esta herramienta interactiva en talleres participativos en agroecosistemas tradicionales de regiones áridas.

Materiales y métodos

Para construir la herramienta de simulación interactiva a partir del modelo de simulación SESSMO, utilizamos el software de simulación *Vensim*, concretamente el programa *Vensim PLE 9.3.5*, que es una versión simplificada y gratuita, la cual permite la construcción y edición de modelos, visualizar los resultados de simulaciones y exportar estos modelos en un formato específico (*.vpmx), el cual puede ser abierto en la aplicación *Vensim Model Reader*. Los modelos en este formato ya no pueden ser estructuralmente modificados, son modelos “publicados” que solo se pueden leer y “jugar” con ellos, activando o desactivando escenarios previamente diseñados. La herramienta de simulación interactiva en este formato de “modelo publicado” se podrá utilizar en talleres participativos con actores locales clave de agroecosistemas tradicionales de regiones áridas (p.ej. población local, agricultores, ganaderos, trabajadores y/o empresarios del sector turístico, representantes de gobiernos locales y/o regionales).

Adecuación del modelo SESSMO

Para la transformación del modelo original SESSMO en una herramienta de simulación interactiva que el público general pueda entender y usar se pensó en dos propiedades clave que debía poseer: claridad y simplicidad.

El modelo inicial estaba en inglés y con la mayor parte de las variables abreviadas, lo que dificultaba su comprensión para cualquier persona que no estuviera relacionado con su creación. Por ello, el modelo se tradujo al español y se incluyó el nombre completo de todas las variables.

Aunque el modelo SESSMO no es un modelo excesivamente complicado, su visualización completa, con todas las relaciones entre variables expresadas con flechas, puede ser abrumadora (Fig. 3). Es por ello, que se hizo el esfuerzo de separar el modelo en cinco submodelos (Fig. 4): 1) población humana, 2) agricultura, 3) ganadería bovina, 4) ganadería caprina, y 5) turismo. Cada submodelo se reordenó para tener el menor cruce de variables posible y tener una mayor claridad de imagen. Se decidió una jerarquía de colores y tamaño de fuente y de flechas para identificar las variables más importantes. El diseño de los submodelos se varió a lo largo de sucesivas versiones con la intención de mejorar su visualización y entendimiento.

El modelo original tenía variables que funcionaban como “activadores” a modo de palanca para activar/desactivar cada una de las medidas de gestión identificadas (Tabla 1). Sin embargo, para simplificar las simulaciones de escenarios y combinaciones que pueden realizar los usuarios de la herramienta interactiva, se modificó la estructura del modelo para que los activadores activaran o desactivaran directamente las principales estrategias de gestión relacionadas con la resiliencia del sistema (i.e. fortalecer la robustez, mejorar la capacidad de adaptación, fomentar la transformación).

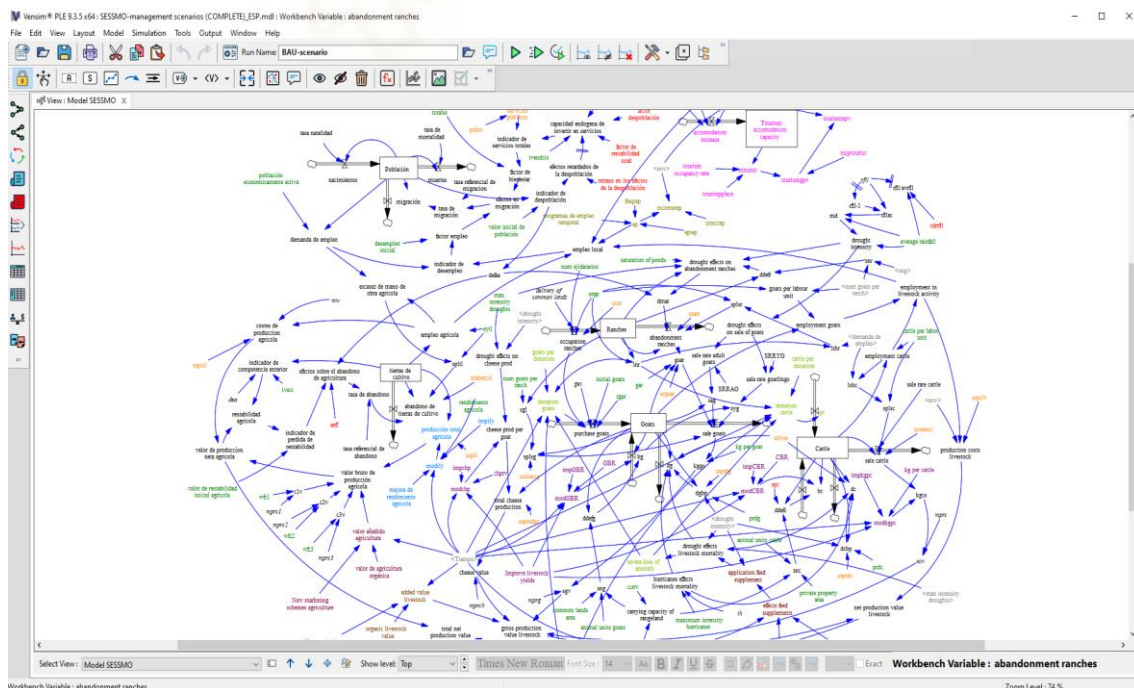


Fig. 3: Captura de pantalla del modelo original SESSMO completo abierto en Vensim.

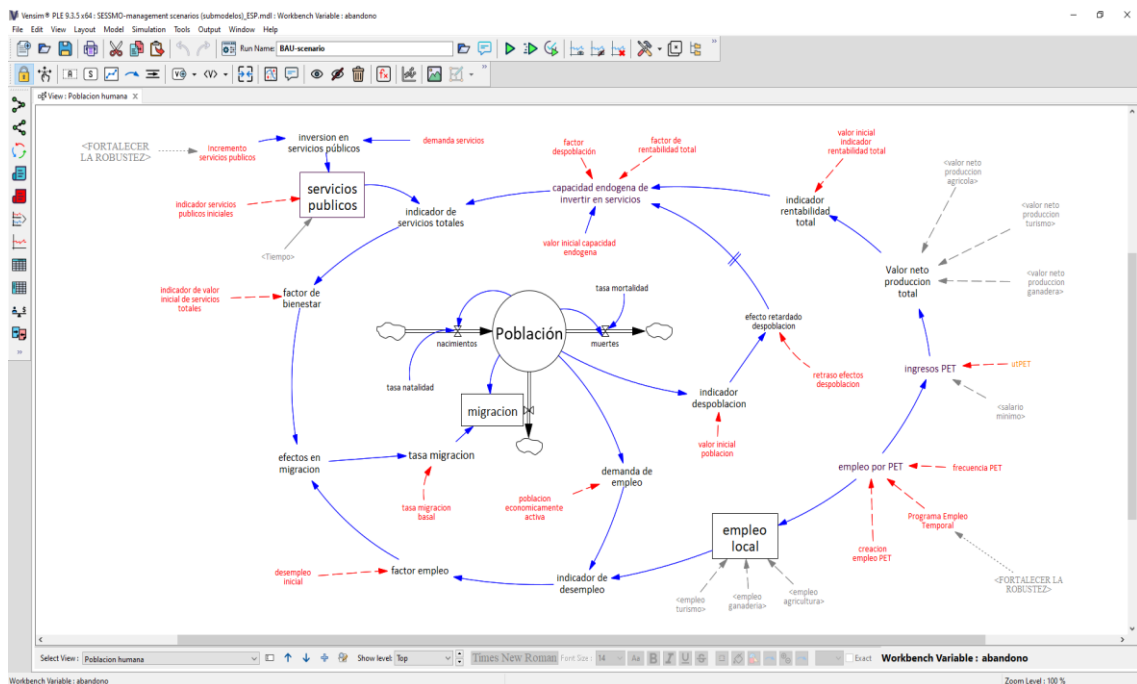


Fig.

4: Captura de pantalla del submodelo “Población humana” en su versión inicial.

Diseño de la herramienta de simulación interactiva

Para que cualquier persona pudiera utilizar el programa y entender los conceptos básicos del modelo se añadieron seis ventanas para que sirvieran de guía de uso. Estas fueron:

- **Sobre el modelo SESSMO:** En esta ventana se presenta el modelo SESSMO, con información sobre su finalidad. Además, se describe el caso de estudio del oasis de Comondú y la problemática sobre la que se desarrolló este modelo.
- **Sobre la resiliencia de SSE:** En esta ventana se da una breve y sencilla explicación del concepto de SSE, resiliencia y las propiedades de robustez, adaptación y transformación.
- **Escenarios climáticos:** En esta ventana se explican los escenarios climáticos con los que cuenta la herramienta interactiva (escenario tendencial, escenario climático favorable y escenario climático desfavorable).
- **Escenarios de gestión:** En esta ventana se enumeran y explican, en primer lugar, las diez medidas de gestión que propusieron los actores locales del caso

de estudio (i.e., población local, investigadores científicos y gobierno regional) y cómo se obtuvieron. A continuación se explica la agrupación de estas medidas de gestión en cuatro grandes estrategias de gestión relacionadas con la resiliencia del sistema: 1) fortalecer la robustez, 2) mejorar la capacidad de adaptación, 3) promover la transformación local, y 4) promover la transformación por agentes externos.

- **Cómo funciona:** En esta ventana se dan las indicaciones necesarias para que cualquier usuario pueda utilizar la herramienta interactiva para hacer simulaciones en Vensim Model Reader (p.ej. cargar datos externos, ejecutar simulaciones, guardarlas, cargar simulaciones existentes, etc.).
- **Exploración de escenarios:** En esta ventana es donde los usuarios pueden ejecutar las simulaciones y ver sus resultados. Cuenta con 4 “interruptores” (o *sliders*) que a modo de palanca permiten activar o desactivar cada estrategia de gestión (se activan cuando las palancas tienen el valor de “1”, y se desactivan cuando tienen el valor de “0”). Consta de 10 gráficas, las cuales muestran los resultados de las simulaciones ejecutadas y cargadas para las principales variables del modelo (desde 2010 a 2050): la población humana, la superficie de regadío en producción, la producción total agrícola, el número de cabezas de ganado caprino, el número de cabezas de ganado bovino, el empleo local disponible, el valor neto de la producción total del oasis (como indicador de la economía local), el valor neto de la producción agrícola, y el valor neto de la producción ganadera. La dinámica de estas variables permite ver los efectos de las estrategias de gestión y los escenarios climáticos en la población del oasis, el empleo, su economía y sus actividades productivas.

Diseño de la guía para implementar la herramienta de simulación interactiva en talleres participativos

A la hora de diseñar el taller participativo se tuvo en cuenta tres cuestiones: ¿A quién irá dirigido?, ¿cuál es el propósito del taller?, ¿cómo medir el nivel de comprensión de conceptos derivado del uso de la herramienta de simulación interactiva?

La población objetivo de este taller y por tanto de todo el trabajo son actores locales de agroecosistemas tradicionales de regiones áridas (p.ej. agricultores, ganaderos, trabajadores y empresarios del sector turístico, representantes de gobiernos locales y/o regionales, miembros de ONGs que trabajen con comunidades rurales). Los propósitos del taller son tres: 1) promover el aprendizaje sobre los conceptos de SSE, resiliencia y sus propiedades de robustez, adaptación y transformación, 2) conocer cuáles pueden ser los efectos del cambio climático, y 3) por qué es importante para la gestión y desarrollo en los agroecosistemas tradicionales de regiones áridas. La finalidad es mejorar el entendimiento del tipo de sistema en el que viven o se relacionan los actores locales y fortalecer la resiliencia de este tipo de sistemas frente a la incertidumbre del cambio climático, para así tener una mayor base de conocimiento a la hora de tomar decisiones.

El taller participativo se estructura en base a la presentación de la herramienta de simulación interactiva y a la realización de ejercicios de simulación a modo de juego, tras haber realizado previamente trabajos en grupo donde los participantes exponen y debaten sobre sus expectativas hacia futuro bajo diferentes escenarios de gestión y de cambio climático. La guía para la realización de estos talleres participativos se expone detalladamente en la sección de resultados.

Resultados

Al tratarse de un trabajo de investigación poco convencional, para facilitar la exposición de los resultados obtenidos se ha decidió por dividir la exposición de estos en tres subsecciones.

Herramienta de simulación interactiva operativa y funcional

La Fig. 5 muestra la interfaz de la ventana “¿Cómo funciona?”. En esta ventana se dan todas las indicaciones necesarias para usar el modelo de simulación Vensim. Se ha procurado utilizar un lenguaje sencillo más divulgativo, diferenciando los pasos en varias casillas de colores claros unidos por flechas.

Además se han incluido una lista de recomendaciones que faciliten su uso o eviten que el programa genere errores.

La Fig.6 muestra la ventana “Sobre el modelo SESSMO” esta contiene una breve explicacion del origen del modelo, su objetivo, el caso de estudio del Oasis de Los comondú asi como una introduccion a los submodelos. Hay dos circulos que guian a otras ventanas si quieren una explicacion mas extensa.

La Fig 7 muestra la ventana de “Sobre la resiliencia de sistemas socioecológicos”. Se compone de cinco casillas que definen de forma breve y con ejemplo los terminos de sistema socioecológico, resiliencia, robustez, adaptabilidad y transformabilidad.

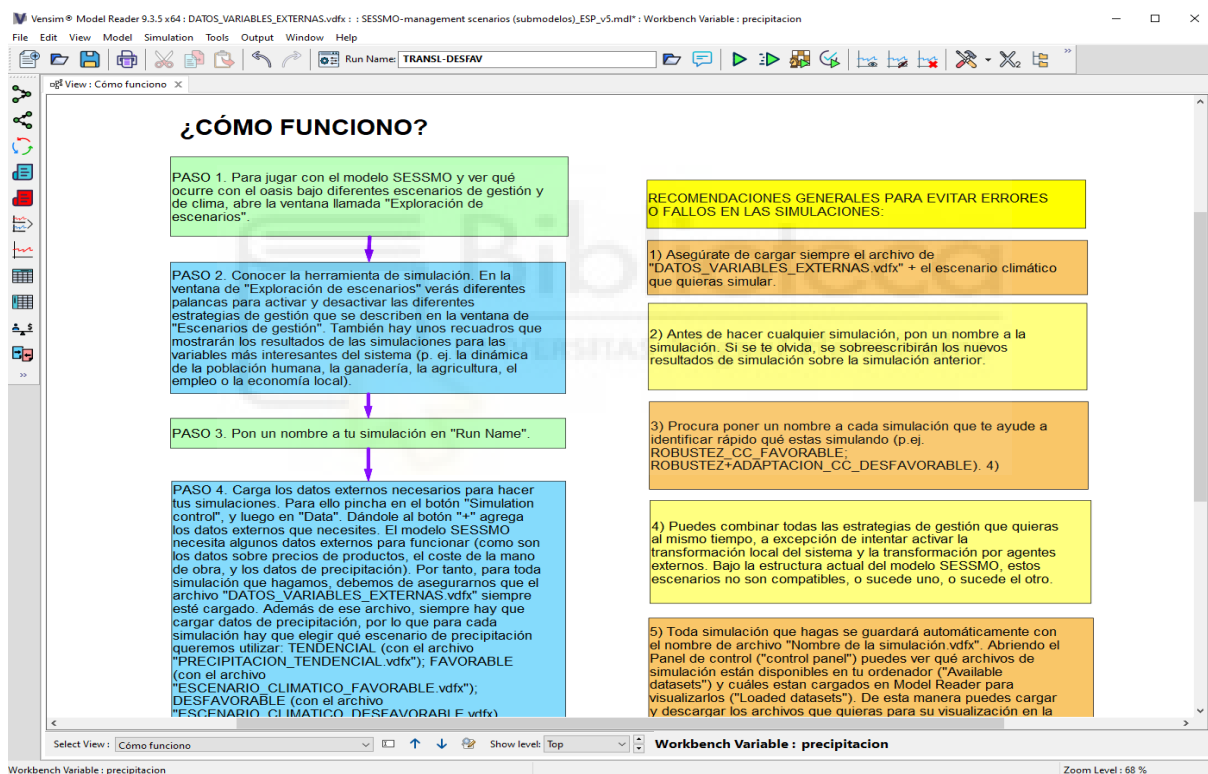


Fig. 5: captura de pantalla ventana funcionamiento del software

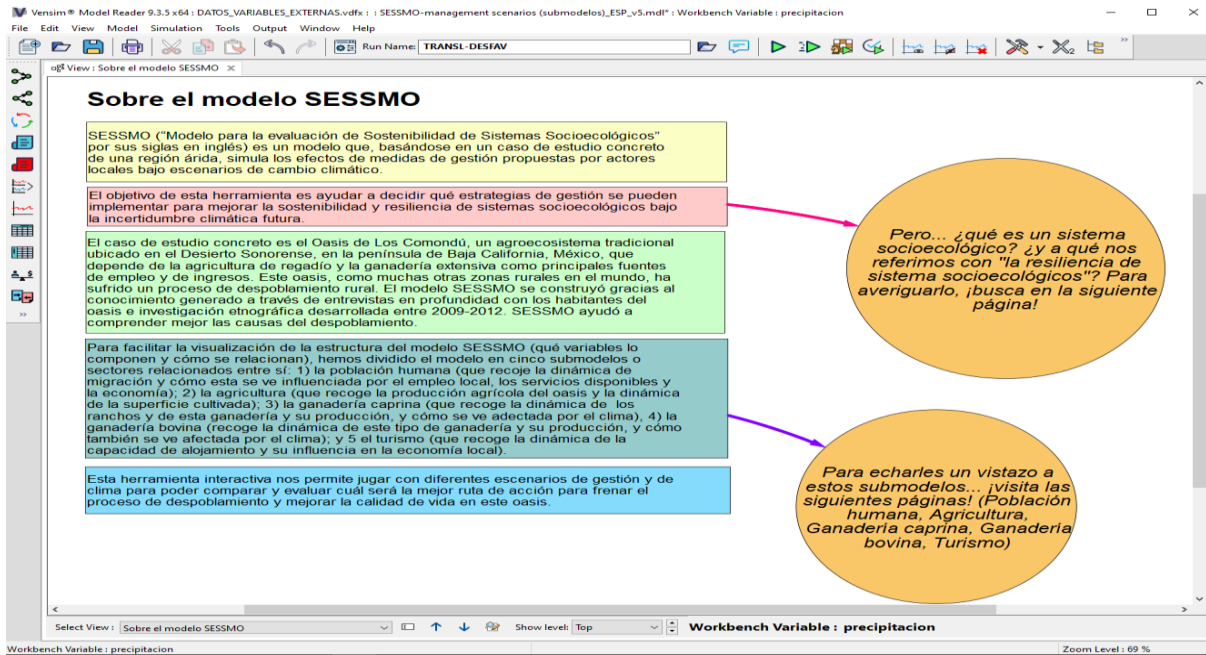


Fig. 6: Captura de pantalla ventana Sobre el modelo SESSMO

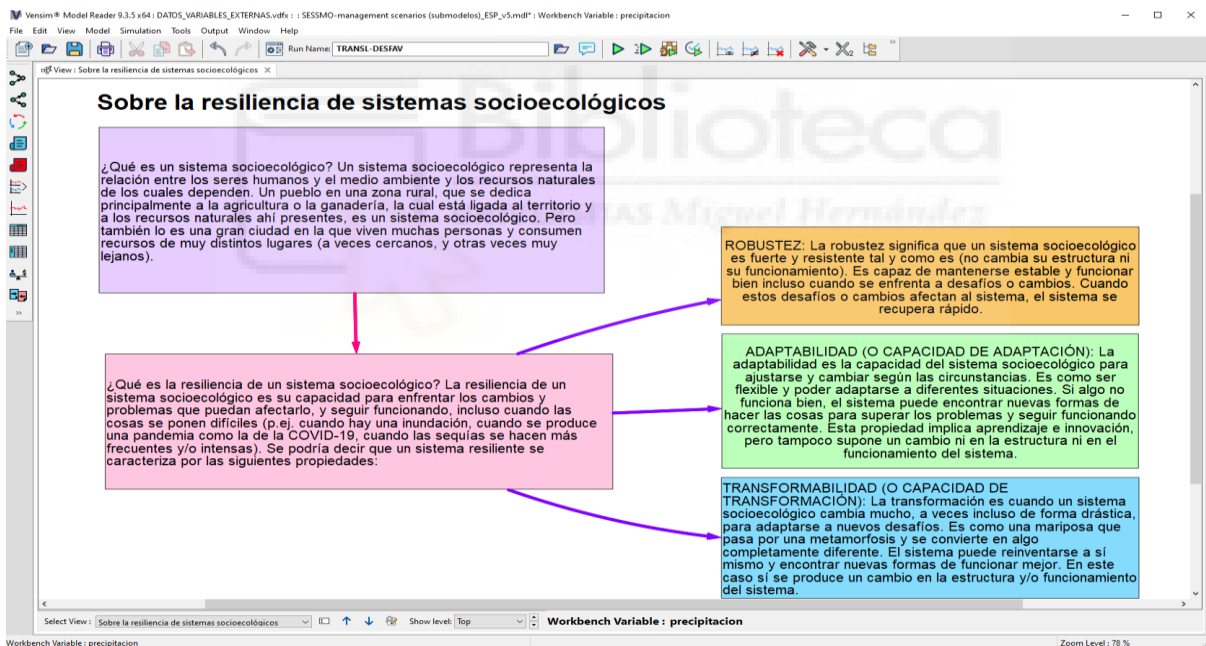


Fig. 7 Captura de pantalla ventana Sobre la resiliencia de sistemas socioecológicos

La Fig. 8 muestra la interfaz de la ventana de "escenarios climáticos". En esta ventana los usuarios pueden conocer cuál ha sido la variación de la precipitación en los últimos 30 años, y cuáles pueden ser las consecuencias de un cambio favorable o desfavorable en la precipitación de acuerdo con las actuales proyecciones de cambio climático.

La Fig. 9 muestra la interfaz de la ventana “escenarios de gestión”. En esta ventana los usuarios pueden conocer las 10 medidas de gestión propuestas por los actores locales. Además explica y pone ejemplos de cómo se clasifican en cuatro grandes estrategias de gestión según la característica de la resiliencia que refuercen: 1) fortalecer la robustez, 2) mejorar la capacidad de adaptación, 3) promover la transformación local, y 4) promover la transformación por agentes externos.

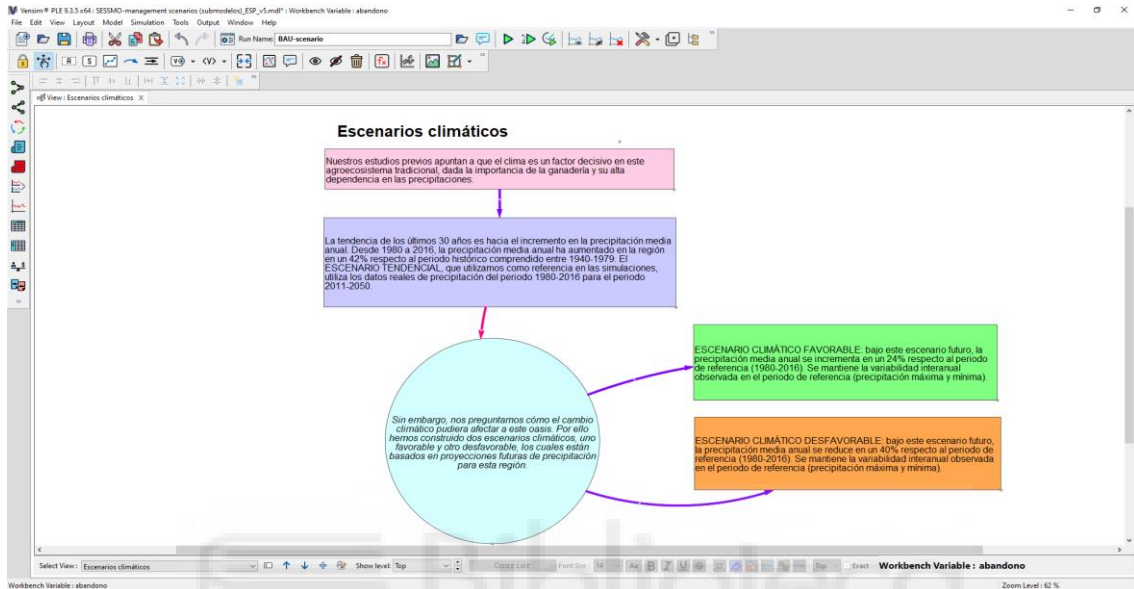


Fig. 8 Captura de pantalla ventana escenarios climáticos

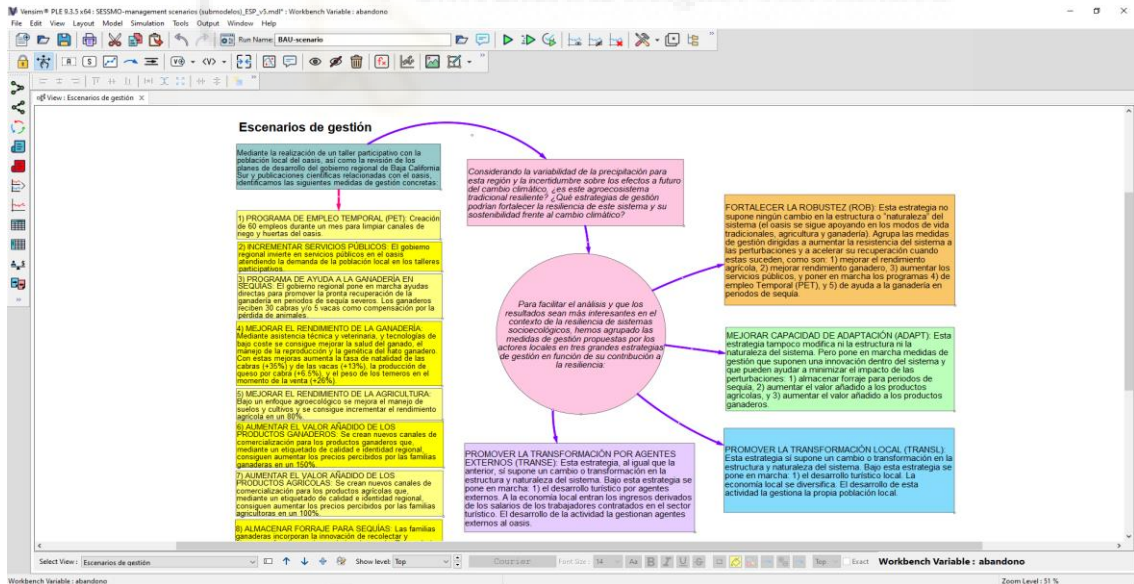


Fig. 9 Captura de pantalla ventana escenarios de gestión.

La Fig. 10 muestra la ventana de exploración escenarios. En esta ventana es donde los usuarios pueden ejecutar las simulaciones y ver sus resultados. Se han añadido cuatro palancas de control para que la selección de estrategia de gestión sea más visual e intuitiva.

En las ventanas de los submodelos Fig. 11-15 se ha procurado usar un lenguaje sencillo y de carácter más divulgativo. Organizado y reordenado las variables de forma que haya el mínimo cruce entre flechas. Se ha creado una jerarquía de colores y tamaño de fuente de forma que sea más sencillo encontrar y reconocer los tipos de variables (p.ej., estrategias de gestión en mayúsculas naranjas, medidas de gestión en verde, variables externas en azul).

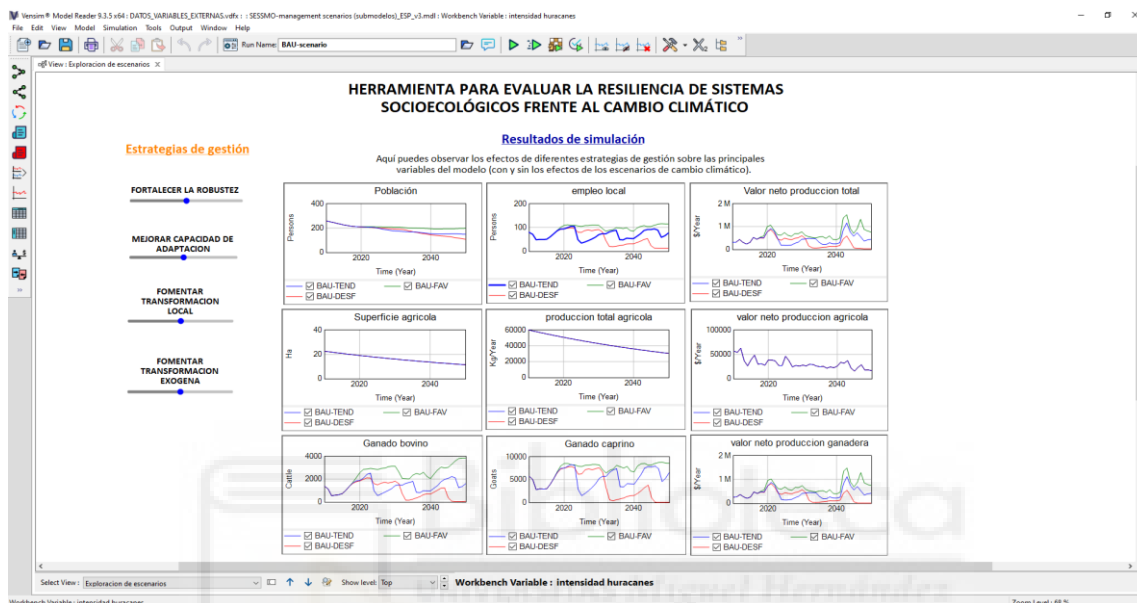


Fig. 10 captura de pantalla de la ventana Exploración de escenarios.

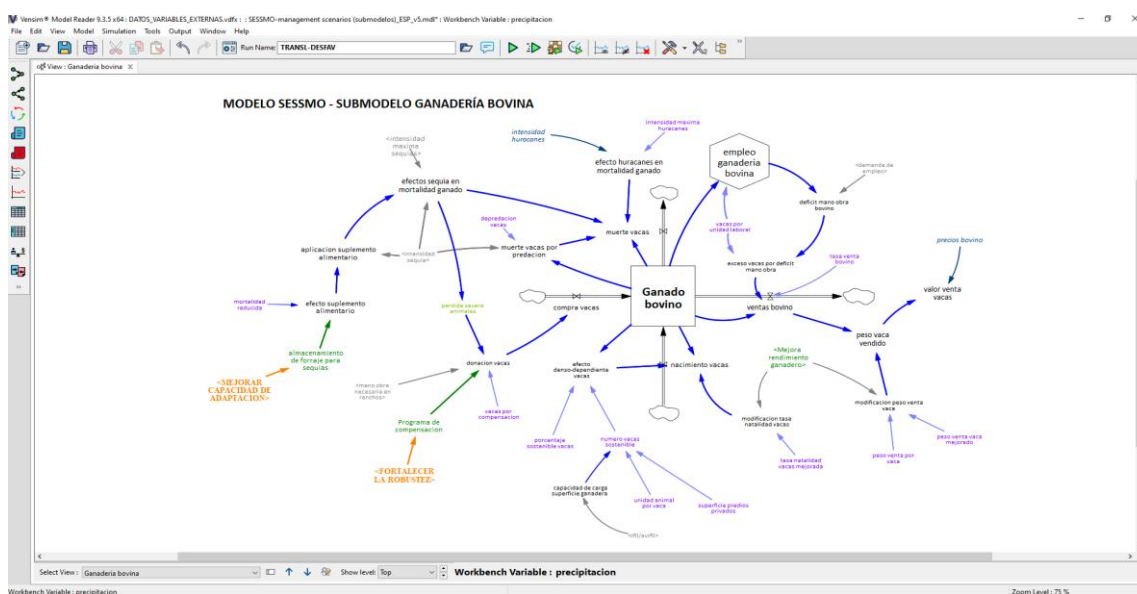


Fig. 11 captura de pantalla ventana submodelo ganado bovino

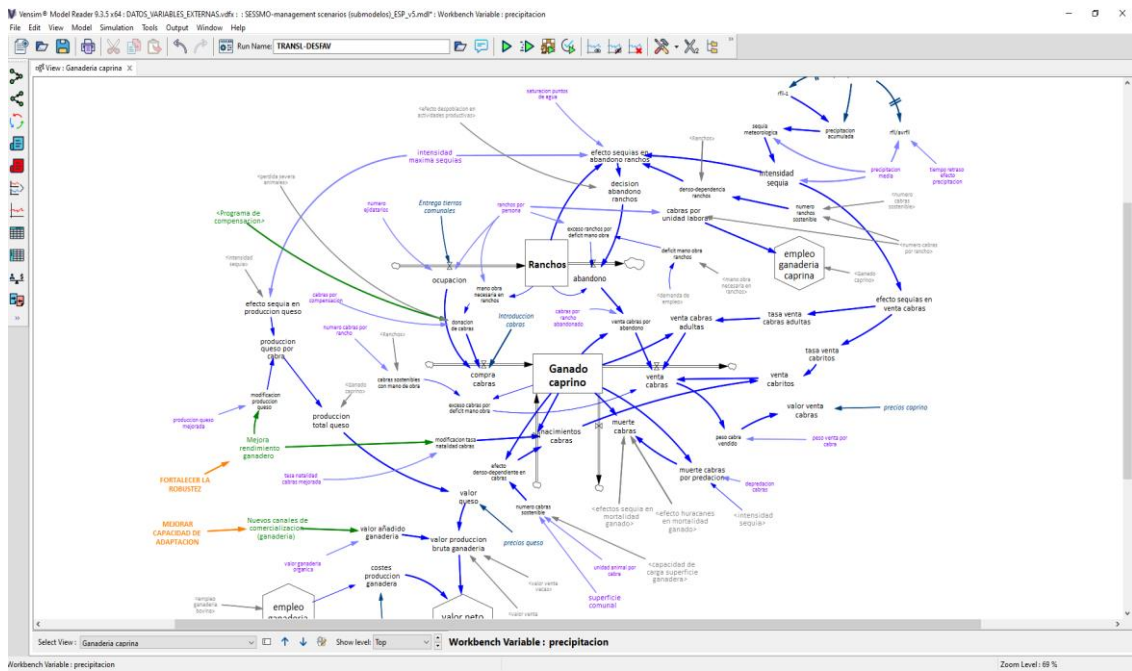


Fig. 12 captura de pantalla ventana submodelo ganado caprino

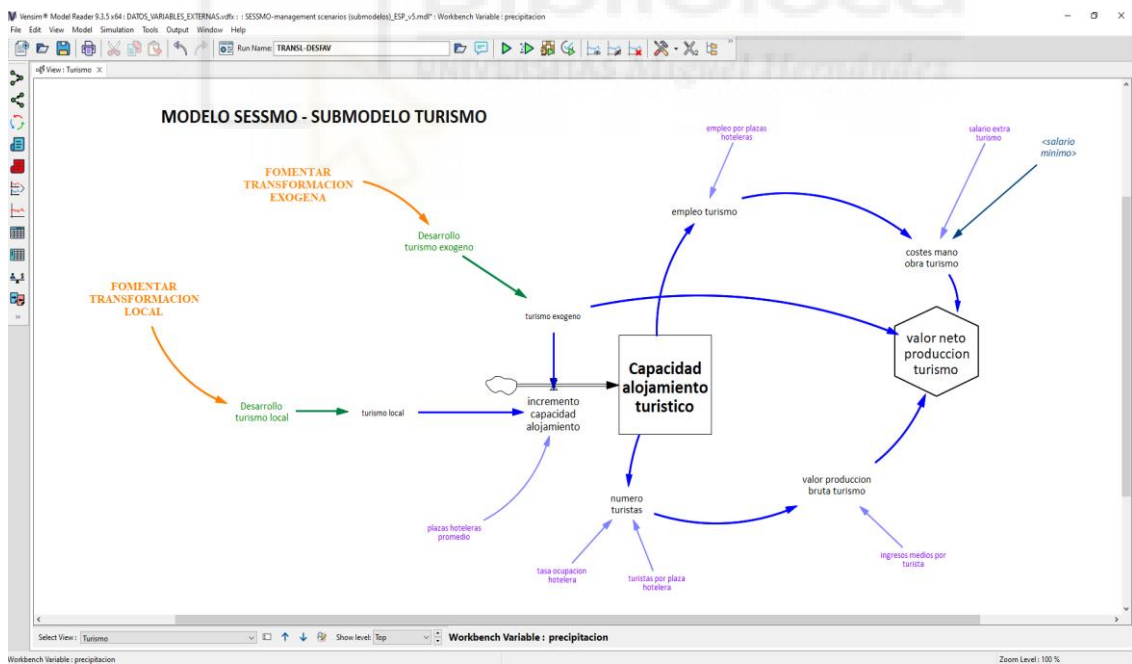


Fig. 13 captura de pantalla ventana submodelo turismo

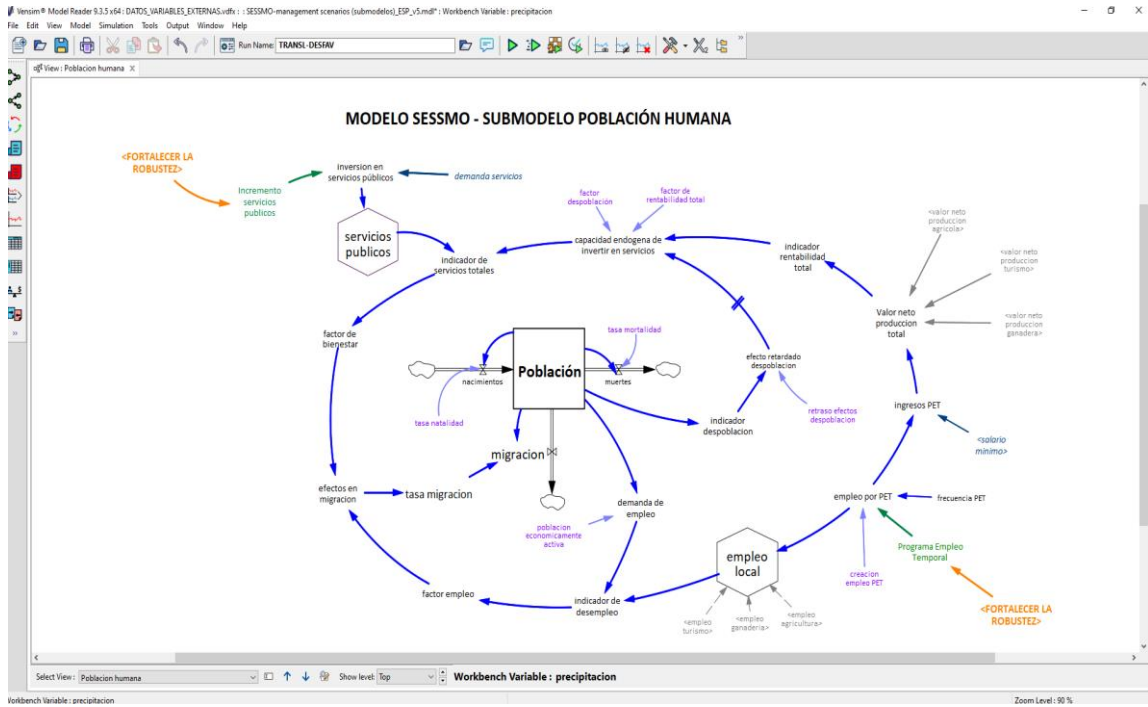


Fig. 14 captura de pantalla ventana submodelo población

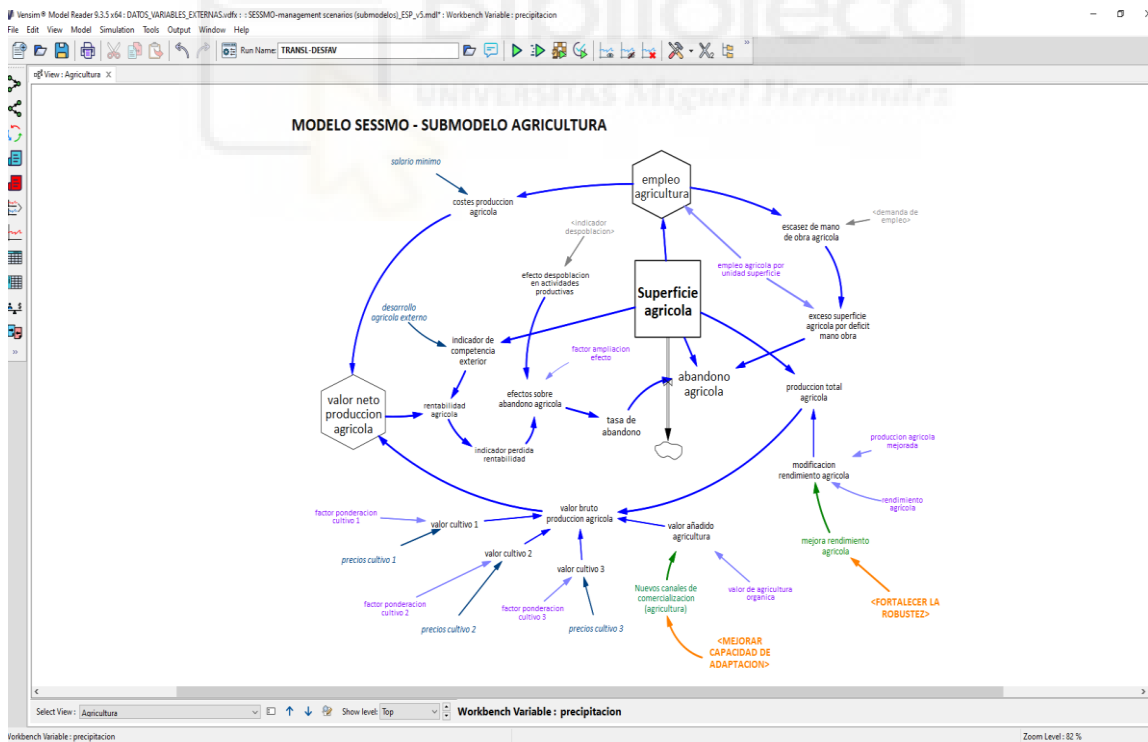


Fig. 15 captura de pantalla ventana submodelo agrícola

Demostración de la herramienta de simulación

Para mostrar el resultado de la herramienta de simulación y su utilidad a la hora de medir, comparar y decidir entre las posibles estrategias de gestión, se han simulado cuatro variables clave del modelo (población, empleo local, economía local y ganadería caprina). Cada variable se ha simulado considerando cinco estrategias de gestión: BAU (business-as-usual), ROB (reforzar la robustez), ADAPT (mejorar la adaptabilidad), TRANSL (promover la transformación local) y RES (mejorar la resiliencia).

La Figura 16 muestra el comportamiento de la evolución de la población frente a las estrategias de gestión en un escenario climático tendencial el cual utiliza datos reales de precipitación del periodo 1980-2016 para el periodo 2011-2050. En el escenario BAU la población disminuye un 42.2% durante el periodo de la simulación. En descenso de población le siguen en orden ADAPT con 35.23%, ROB con 28.4% y TRANSL con 26% siendo el escenario de mejorar la resiliencia RES el único que incrementa la población hasta un 21.4% en 2050 llevando a 312 habitantes. Lo más remarcable de esta simulación es ver que la estrategia de TRANSL se sitúa por debajo de ROB hasta 2046 que por primera vez lo supera.

Este orden se repite en la variable de empleo ya que están directamente relacionados. En esta simulación el escenario BAU presentan los mínimos y máximos más bajos con su menor dato en 2025 con un descenso de empleo de un 42% (33 personas) hasta alcanzar en 2050 un descenso del 4%, las demás estrategias repiten los ciclos de mínimos y máximos, pero terminan con un balance positivo de creación de empleo siendo este: ADAPT 5.6%, ROB 13.2%, TRANSL 38% y RES 59.4%

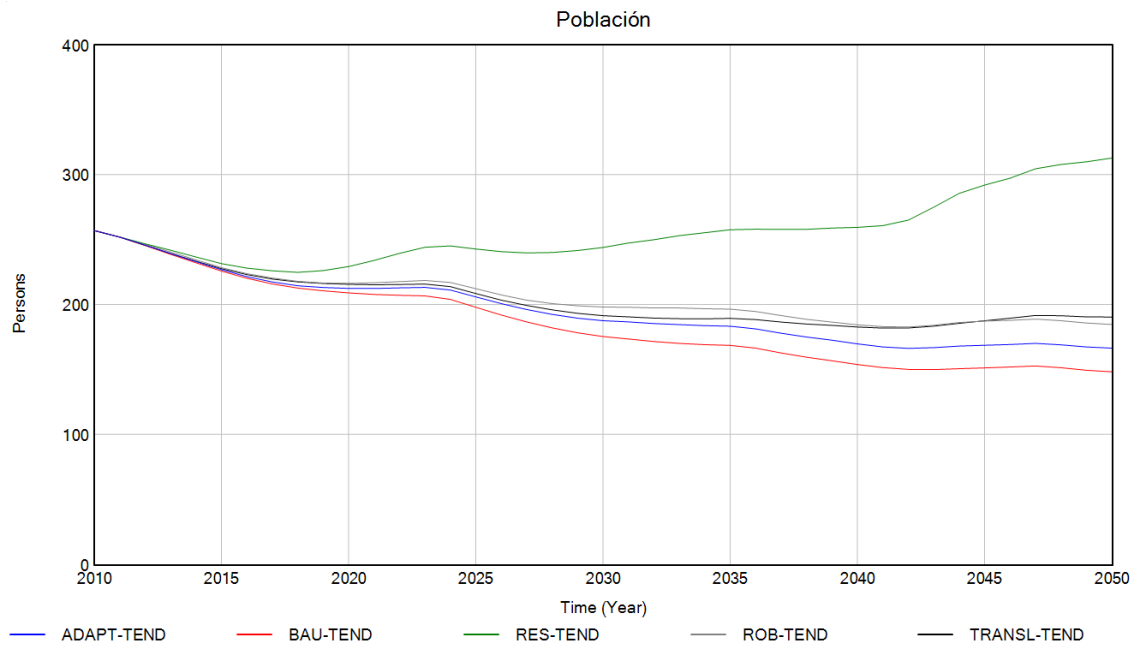


Fig. 16 evolución población escenario tendencial en escenarios de gestión Adaptación, Business-at-usual (sin estrategia), resiliencia, robustez, transformación local

La Fig.17 muestra la evolución tanto del valor de producción total como de la cantidad de ganado caprino.

En cantidad de ganado caprino la estrategia más efectiva es RES con un incremento de un 29.8% seguido de ROB con un 27.6% y de ADAPT con 21%.

Cabe destacar que a diferencia de en la población y empleo donde TRANSL mostraba los mayores resultados aquí se muestra casi igual al BAU con una diferencia de menos de 0.5%.

En valor neto de producción total RES presenta un incremento del 84.4%, ADAPT un 74.8% seguido de TRANSL y ROB con 59.2% y 51.55%.

Se puede observar que las estrategias ROB y TRANSL son las más estables ya que tienen poca variación tanto de crecimiento como de disminución en variables como la población, el empleo o el ganado caprino. Esta estabilidad también provoca que en variables donde se busca un gran cambio de tendencia sean menos eficaces que las estrategias de ADAPT como es el caso de incrementar el valor neto.

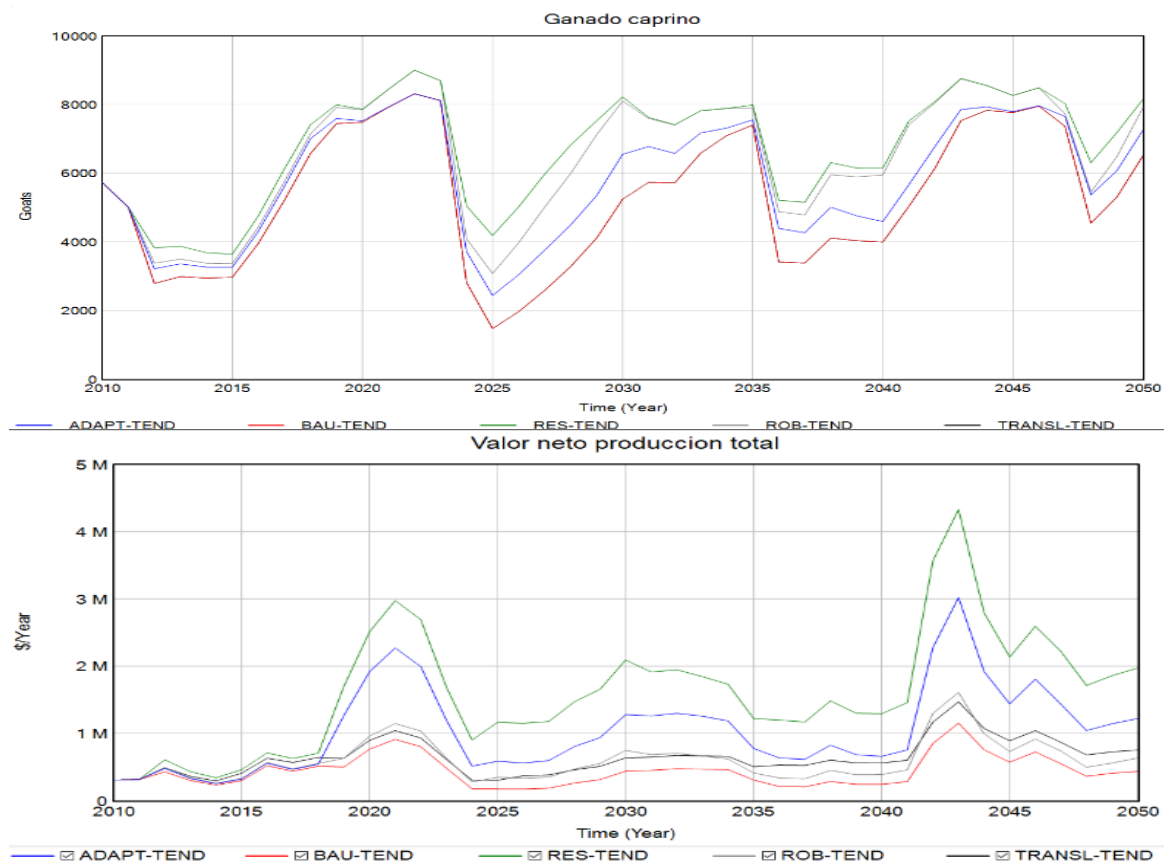


Fig. 17 a) evolución ganado caprino en escenario climático tendencial en las estrategias de gestión *Adaptación favorable*, *Robustez favorable*, *Transformación local favorable*, *Adaptación desfavorable*, *Robustez desfavorable*, *Transformación local desfavorable*

b) evolución valor neto producción total en escenario climático tendencial en las estrategias de gestión: *Adaptación favorable*, *Robustez favorable*, *Transformación local favorable*, *Adaptación desfavorable*, *Robustez desfavorable*, *Transformación local desfavorable*

Tabla 1. Resultados de simulación de las estrategias de gestión bajo el **escenario climático tendencial** para variables clave del modelo a tiempo final de la simulación ($t = 2050$). Las estrategias de simulación simuladas son: i) Fortalecer la robustez (ROB), ii) Mejorar la capacidad de adaptación (ADAPT), iii) Promover la transformación local (TRANS), y iv) Fortalecer la resiliencia (RES), la cual implica activar al mismo tiempo las tres estrategias de gestión.

Estrategia de gestión	Población (habitantes)	Empleo local (puestos de trabajo)	Economía local (dólares constantes)	Ganadería caprina (número de cabras)
BAU	148	76	435.832	6.498
ROB	184	89	633.500	7.913
ADAPT	166	83	1.220.230	7.256
TRANS	190	109	753.885	6.516
RES	312	126	1.971.980	8.154

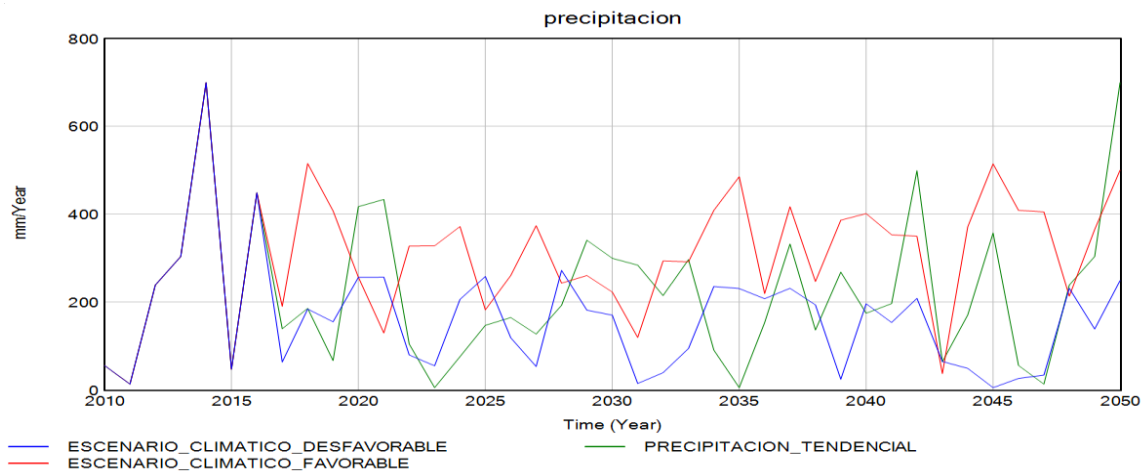


Fig. 18. Simulación dinámica evolución precipitación en escenarios climáticos: *Escenario tendencial*, *escenario favorable*, *escenario desfavorable*

Todos los resultados anteriores se han obtenido con el supuesto de un escenario climático tendencial. Sin embargo, para decidir la estrategia de gestión a seguir es importante comparar el resultado de las simulaciones anteriores con otros escenarios climáticos ya que puede ocurrir que la eficacia de las estrategias de gestión cambie en función del escenario climático.

Esto se muestra en la Fig.19 que representa el valor neto de producción total de las estrategias ADAPT, ROB y TRANSL en un escenario climático favorable y otro desfavorable. Como se puede observar, en un escenario favorable ADAPT muestra ser la estrategia más eficiente llegando en 2043 a los 3.7 millones de dólares. Esto puede llevar a personas que vean esta simulación a asumir que es la mejor estrategia a seguir. Pero en el escenario climático desfavorable se observa que aunque ADAPT los primeros años rinde mejor en 2050 el sistema colapsa, mientras ROB y TRANSL resisten mejor las perturbaciones.

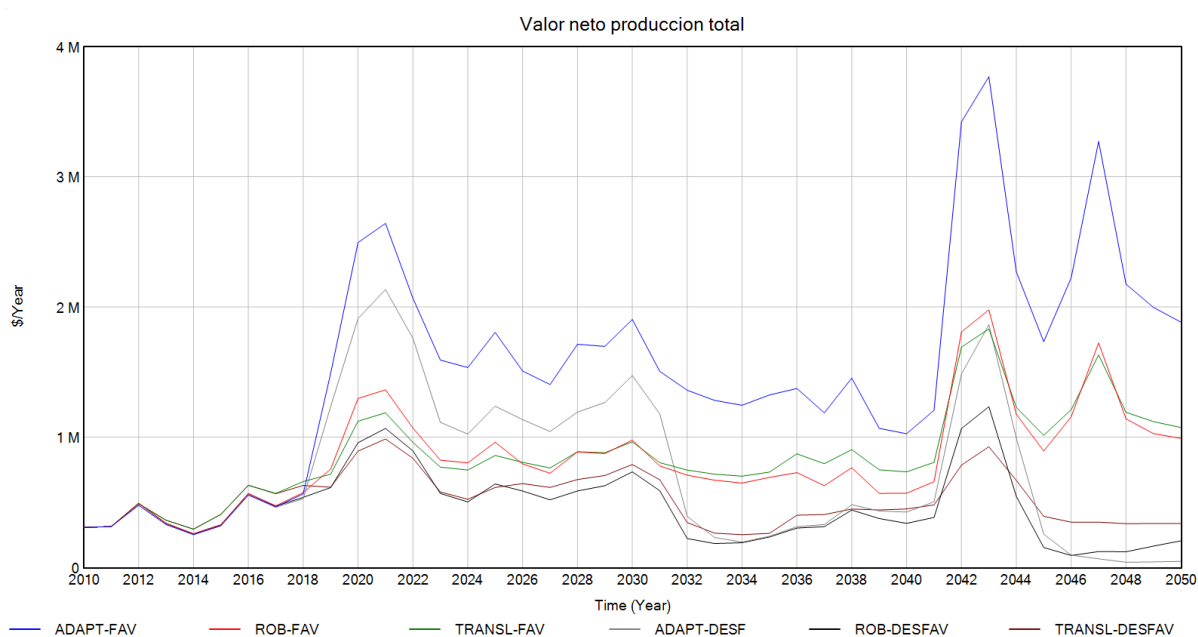


Fig.19 simulación dinámica con herramienta Vensim, comparación escenario climático favorable y desfavorable en variable valor neto producción local de las estrategias de gestión *Adaptación favorable*, *Robustez favorable*, *Transformación local favorable*, *Adaptación desfavorable*, *Robustez desfavorable*, *Transformación local desfavorable*

Todo lleva a pensar que no hay una estrategia de gestión que sea adecuada para todos los casos. Depende de qué variable clave se quiera mejorar y del contexto climático. Por ello, RES que es la suma de todas las estrategias, se muestra como la más eficiente en todas las variables y en los tres escenarios climáticos.

Tabla 2. Resultados de simulación de las estrategias de gestión bajo el **escenario climático desfavorable** para variables clave del modelo a tiempo final de la simulación ($t = 2050$). Las estrategias de simulación simuladas son: i) Fortalecer la robustez (ROB), ii) Mejorar la capacidad de adaptación (ADAPT), iii) Promover la transformación local (TRANSL), y iv) Fortalecer la resiliencia (RES), la cual implica activar al mismo tiempo las tres estrategias de gestión.

Estrategia de gestión	Población (habitantes)	Empleo local (puestos de trabajo)	Economía local (dólares constantes)	Ganadería caprina (número de cabras)
BAU	108	12	18.445	0
ROB	148	34	203.759	2360
ADAPT	122	12	45.895	0
TRANS	150	45	336.461	4
RES	239	72	884.014	2.915

Tabla 3. Resultados de simulación de las estrategias de gestión bajo el **escenario climático favorable** para variables clave del modelo a tiempo final de la simulación (t = 2050). Las estrategias de simulación simuladas son: i) Fortalecer la robustez (ROB), ii) Mejorar la capacidad de adaptación (ADAPT), iii) Promover la transformación local (TRANSL), y iv) Fortalecer la resiliencia (RES), la cual implica activar al mismo tiempo las tres estrategias de gestión.

Estrategia de gestión	Población (habitantes)	Empleo local (puestos de trabajo)	Economía local (dólares constantes)	Ganadería caprina (número de cabras)
BAU	196	114	756.556	8585
ROB	241	124	990.878	9296
ADAPT	217	114	1.882.880	8585
TRANS	241	147	1.074.370	8585
RES	470	157	2.781.520	9296

Guía para implementar la herramienta de simulación interactiva en talleres participativos

A continuación se describe la guía diseñada para utilizar la herramienta de simulación interactiva presentada anteriormente en talleres participativos.

Descripción de participantes potenciales

Cada taller constará de entre 10-12 participantes. De la población local se seleccionarán actores clave, buscando la máxima diversidad y representación de hombres, mujeres y clases de edad. Se procurará que entre los participantes haya personas dedicadas a los principales sectores económicos de la zona: ganadería, agricultura y sector turístico, además de representantes de gobierno local o regional, y miembros de ONGs que trabajen en la zona.

Descripción de los materiales necesarios para el taller

- Proyector.
- Ordenador portátil.
- Software herramienta de simulación interactiva.
- Hojas de consentimiento informado.

- Presentación en Power Point de apoyo para guiar la dinámica del taller.
- Cuestionario para Ejercicio 1: valoración individual de los efectos esperados de los escenarios de gestión sobre la dinámica del sistema (¿qué estrategia contribuye más a frenar el despoblamiento?).
- Cuestionario para Ejercicio 2: valoración individual de los efectos esperados de los escenarios de gestión bajo los efectos del cambio climático sobre la dinámica del sistema (¿qué estrategia contribuye más a frenar el despoblamiento en un escenario climático favorable? ¿y en un escenario desfavorable?).
- Cuatro láminas de papel estraza (a modo de murales).
- Cartulinas blancas.
- Cinta adhesiva.
- Rotuladores negros de punta gruesa.

Dinámica del taller participativo

- Bienvenida y presentación de los participantes.

El taller se iniciará dando la bienvenida a todos los participantes y agradeciendo su asistencia. Tras esta breve introducción, y con el objetivo de crear un ambiente de confianza, se procederá a hacer una ronda de presentaciones sencilla en la que cada uno diga su nombre y a qué se dedica principalmente.

Tras la ronda de presentaciones, el equipo facilitador del taller explicará y entregará las hojas de consentimiento informado para que sean firmadas por los participantes. De este modo se garantizará que toda persona participante en el taller conoce sus derechos como participante, así como los riesgos y beneficios y que, habiendo sido informado, participa de manera voluntaria.

- Presentación de los objetivos y dinámica del taller participativo.

- Introducir los conceptos de resiliencia, robustez, adaptación y transformación.
- Aprender sobre la dinámica de SSE en ambientes áridos. - Reflexionar sobre las mejores estrategias para fortalecer a largo plazo la resiliencia de este tipo de sistemas bajo la incertidumbre climática (necesidad de contextualizar cada caso de estudio).

El taller se divide en tres partes, una primera parte introductoria a los conceptos de resiliencia de SSE y de presentación del modelo SESSMO y la herramienta de simulación interactiva, y dos ejercicios de simulación acompañados de discusión, el primero de ellos centrado en los escenarios de gestión, y el segundo en los efectos de los escenarios de gestión bajo los efectos potenciales del cambio climático.

PARTE 1. Introducción de conceptos y presentación de herramienta interactiva (40 minutos)

El equipo facilitador presentará de manera general el modelo SESSMO y los objetivos para los cuales se creó el modelo haciendo uso de las pestañas informativas de la herramienta de simulación interactiva.

Tras esta presentación, se indagará sobre el conocimiento de partida de los participantes del concepto de resiliencia (¿qué entienden por resiliencia? ¿habían escuchado antes esa palabra? ¿qué es para ellos ser resiliente?). Ronda de participación abierta. En una lámina de estraza, el equipo facilitador escribirá como título “Resiliencia (punto de partida)” e irá escribiendo en cartulinas blancas las palabras clave que surjan de las definiciones de los participantes. Estas cartulinas blancas quedarán pegadas en la lámina de estraza. Este mural quedará colgado hasta la finalización del taller.

Tras esto, el equipo facilitador hará una breve presentación de los conceptos de resiliencia, robustez, adaptación y transformación.

PARTE 2. Simulación de estrategias de gestión (60 min)

El equipo facilitador dividirá a los participantes en dos grupos de 5-6 personas (tratando de equilibrar los grupos, que ambos grupos sean diversos en cuanto a la profesión de los participantes, género y edad).

Se hará una presentación general de las medidas de gestión que los actores locales del caso de estudio propusieron para mejorar la calidad de vida y frenar el despoblamiento del oasis de Comondú, y cómo esas medidas de gestión las agrupamos en tres grandes estrategias para contribuir a la resiliencia del sistema. Las estrategias de gestión, y qué medidas incluyen quedarán siempre a la vista durante este ejercicio.

Tras la presentación, el equipo facilitador pasará un cuestionario individual (cuestionario – Ejercicio 1) para que cada participante valore del 1-10 el impacto de cada estrategia de gestión sobre el sistema, en concreto, sobre la problemática del despoblamiento (siendo 1 un impacto nulo o imperceptible, y 10 un impacto muy notable, capaz de revertir el despoblamiento). Con este cuestionario podremos conocer las expectativas de cada participante (y si hay diferencias por su profesión, género o edad).

Tras completar el cuestionario individual, se le pedirá a cada grupo que hablen sobre los posibles efectos de las estrategias de gestión (¿qué estrategia podría frenar en mayor medida el despoblamiento? ¿cuál aumentaría el empleo local? ¿cuál contribuiría más a la economía local?). Se les dejará 10-15 minutos de discusión a ambos grupos para alcanzar un consenso dentro de cada grupo. Se les entregará unas cartulinas blancas con las estrategias de gestión escritas. Pasado este tiempo, se pedirá a un representante de cada grupo que salga y ponga en una lámina de estraza las estrategias de gestión en cartulinas blancas y ordenadas de mayor a menor impacto, justificando su decisión.

Con las expectativas de cada grupo colgadas en el mural, se iniciará el primer ejercicio de simulación colectiva. Se irán simulando una por una las estrategias de gestión. Tras cada simulación, el equipo facilitador ayudará con la explicación e interpretación de los resultados gráficos. Con todas las estrategias simuladas se procederá a una discusión abierta comparando las expectativas con los resultados

obtenidos (¿se han cumplido las expectativas? ¿hay efectos o resultados inesperados? ¿a qué se pueden deber?).

PAUSA – Descanso de participantes y equipo facilitador (20 minutos).

PARTE 3. Simulación de estrategias de gestión bajo escenarios de cambio climático (90 minutos)

Se hará una presentación general de los escenarios de cambio climático (tendencia, favorable y desfavorable; ¿qué implica cada uno de ellos?). La descripción de los escenarios climáticos y sus implicaciones quedarán siempre a la vista durante este ejercicio.

Tras la presentación, el equipo facilitador pasará un cuestionario individual (cuestionario – Ejercicio 2) para que cada participante valore del 1-10 el impacto de cada estrategia de gestión sobre el sistema bajo los escenarios climáticos “favorable” y “desfavorable” (siendo 1 un impacto nulo o imperceptible, y 10 un impacto muy notable, capaz de revertir el despoblamiento).

Tras completar el cuestionario individual, se le pedirá a cada grupo que hablen sobre los posibles efectos de las estrategias de gestión (¿creen que el efecto del cambio climático puede afectar al impacto de las estrategias de gestión? ¿qué estrategia de gestión es más efectiva bajo cada escenario?) Se les dejará 20-30 minutos de discusión a ambos grupos para alcanzar un consenso dentro de cada grupo. Se les entregará unas cartulinas blancas con las estrategias de gestión escritas. Pasado este tiempo, se pedirá a un representante de cada grupo que salga y ponga en una lámina de estraza las estrategias de gestión en cartulinas blancas y ordenadas de mayor a menor impacto bajo cada uno de los escenarios climáticos, justificando su decisión.

Con las expectativas de cada grupo colgadas en el mural, se iniciará el segundo ejercicio de simulación colectiva. Se irán simulando una por una las estrategias de gestión para cada uno de los escenarios climáticos (favorable y desfavorable). Tras cada simulación, el equipo facilitador ayudará con la explicación e interpretación de los resultados gráficos. Con todas las estrategias simuladas se procederá a una discusión abierta comparando las expectativas con los resultados obtenidos (¿se

han cumplido las expectativas? ¿hay efectos o resultados inesperados? ¿a qué se pueden deber?).

DISCUSIÓN FINAL Y CIERRE DEL TALLER (40 min)

El equipo facilitador retomará los conceptos de resiliencia, robustez, adaptación y transformación tras todos los ejercicios de simulación realizados. Volverá a hacer una ronda abierta de discusión sobre qué entendemos por estos conceptos. Sobre otra lámina de estraza titulada “Resiliencia (qué sabemos ahora)”, anotará en cartulinas blancas las palabras clave y las pegará en la lámina. Se compararán las láminas inicial y final (¿qué hemos aprendido?).

Haciendo uso del proyector, se mostrarán los resultados de las valoraciones individuales del impacto de las estrategias de gestión, y de las estrategias de gestión bajo los escenarios climáticos. Se discutirá sobre las similitudes y diferencias entre las ideas iniciales de los participantes y los resultados de las simulaciones.

Reflexión general sobre aprendizajes obtenidos.

Discusión

A lo largo de este trabajo se ha reflexionado sobre la complejidad de los sistemas socioecológicos (Berkes and Folke 1998, Janssen et al. 2007). Con este término se destaca la estrecha relación entre los sistemas humanos y ambientales, y rompe con las tradiciones no trasdisciplinarias a la hora de gestionar los territorios y tomar decisiones. Es decir, la conservación de los ecosistemas no es un tema único de la ecología, sino que está estrechamente relacionada con la población local, las migraciones, el empleo, la cultura y tradiciones locales, la gestión del territorio y las decisiones de los gobiernos. Pero, además hay que considerar las diferentes escalas de actuación ya que, por ejemplo, un pequeño sistema rural puede verse influenciado por factores a nivel estatal o global como el desarrollo tecnológico o la crisis climática que vuelve los factores ambientales cada vez más impredecible.

En este trabajo se ha mostrado lo complejo e impredecible que puede ser una tomar decisiones en tema gestión ambiental; cómo la que parece la mejor opción

puede dejar de serlo cuando se comparan todas las alternativas o cuando el escenario climático cambia. Las simulaciones dejan claro que fomentar la resiliencia es la mejor opción en todos los escenarios climáticos, pues es una combinación de las otras estrategias de gestión que buscan mejorar la robustez, adaptación y transformación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los resultados de este modelo son de un caso específico y responde por tanto a una realidad y a una problemática concreta que puede no ser la misma que otros agroecosistemas tradicionales. Por tanto, más que el resultado concreto de estas simulaciones, lo más destacado es el valor y utilidad de la herramienta interactiva a la hora de divulgar la complejidad, problemática y posibles estrategias de gestión en casos concretos.

Las poblaciones locales deberían ser partícipes de la toma de decisiones que afecten al futuro de su zona para aumentar su compromiso y empoderamiento para obtener resultados más efectivos y exitosos (Palomo et al. 2011). Para fomentar la implicación de la población en la toma de decisiones se requiere de una participación conjunta entre la población civil, organizaciones civiles que fomenten la divulgación científica necesaria para una buena toma de decisiones y el gobierno como punto conector y financiador.

Introducir a la población local en conceptos científicos tan complejos como SSE, resiliencia, estrategias de gestión, escenarios climáticos puede resultar complicado y, para facilitararlo, se puede dar uso de las herramientas de simulación de sistemas dinámicos (Haag 2001, Tenza-Peral et al. 2020). La dinámica de sistemas presenta una serie de ventajas a la hora de afrontar la complejidad de un SSE como ser capaz de utilizar una amplia gama de fuentes de información como datos empíricos, datos estadísticos y cualitativos. Esto permite a la creación de modelos enriquecerse por enfoques participativos como pueden ser talleres participativos.

Por estos motivos las herramientas de simulación presentan un potencial de divulgación científica y lúdica, así como herramienta de apoyo en los procesos de toma de decisiones. Que la población tenga una participación activa en las actividades de divulgación o concienciación se ha demostrado más eficaz en la retención de conceptos y aprendizaje (Speelman et al. 2014, García-Barrios et al. 2015, 2017, Meizen-Dick et al. 2016). Otro ejemplo de utilización de herramientas de simulación como herramienta didáctica se realizó en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, donde se usó el modelo "Tree Recruitment Under Exotic GRASs in

the Pine-savanna” o TRUE GRASP, por sus siglas en inglés, para mostrar a la población distintos estados futuros de un bosque de pino resinero bajo diferentes opciones de manejo (ganadería, quemadas controladas, desbroces manuales, etc.) (Braasch et al. 2018). La mayor ventaja que presenta ese modelo frente al utilizado en este trabajo, es que es más visual al tratarse de un modelo basado en agentes (donde los resineros y las vacas se mueven por un paisaje virtual, y se ven los efectos del manejo sobre el paisaje), mientras que los resultados de un modelo de dinámica de sistemas, como es nuestro caso, se limitan a graficas lineales. Aun con sus limitaciones el software Vensim ha demostrado tener la capacidad de adaptar un modelo de dinámica de sistemas complejo y ser utilizado como material didáctico para un público ajeno a la comunidad científica.

Esperamos que el taller participativo diseñado se pueda utilizar en el futuro no solo con la población local del oasis de Comondú sino también como recurso educativo para mejorar el entendimiento del funcionamiento de sistemas complejos, del concepto de resiliencia y del efecto del cambio climático en los sistemas agroambientales tradicionales. Si bien hubiera sido de interés poder poner en práctica este taller, por razones obvias de tiempo y recursos, no ha sido posible.

Conclusiones

El modelo SESSMO permite explorar la complejidad de un sistema socioecológico, y cómo contribuir a la resiliencia del sistema mediante diferentes estrategias de gestión bajo escenarios de cambio climático.

La herramienta de simulación interactiva construida a través de este trabajo ha sido diseñada para acercar este modelo y permitir que usuarios no especializados en la modelización (el público en general) explore los conceptos de sistemas socioecológicos, resiliencia y cambio climático de una manera más atractiva y visual a modo de juego. Los resultados obtenidos contribuyen a la transferencia de conocimiento y a la aplicabilidad de este modelo de simulación, con expectativas reales de que pueda ser utilizado para apoyar procesos de toma de decisión en materia de gestión y desarrollo en agroecosistemas tradicionales de regiones áridas.

Se ha diseñado una guía para utilizar esta herramienta interactiva en agroecosistemas tradicionales de regiones áridas mediante talleres participativos. Se prevé la realización de entre 2-4 talleres participativos en agroecosistemas tradicionales del desierto sonorense y chihuahuense de México en primavera de 2024 en el contexto del proyecto de investigación e incidencia actualmente vigente “Sustentabilidad y resiliencia de sistemas socioecológicos ante el cambio climático. bienestar social, patrimonio biocultural y seguridad alimentaria en sistemas ganaderos tradicionales en ambientes áridos” financiado por el Consejo Nacional de Humanidades y Ciencias y Tecnologías (CONHACYT) de México.

Bibliografía

- Aguilera et al. 2020. Emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema agroalimentario. Real Academia de Ingeniería.
- Assessing resilience in social-ecological systems: workbook for practitioners. (2010). Resilience Alliance.
- Berkes F, and Folke C (Eds). 1998. Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. Cambridge University Press, New York.
- Braasch, A., García-Barrios, L., Cortina-Villar, S., Huber-Sannwald, E., Ramírez-Marcial, N. 2018. TRUE GRASP: Actors visualize and explore hidden limitations of an apparent win-win land management strategy in a MAB reserve. *Environmental Modelling & Software*, 105: 153-170.
- Breceda, A., Tenza-Peral, A., Giménez-Casalduero, A., Cariño-Olvera, M., & Echeverría-Ayala, Y. (2020). Visions of the future in the oases of Baja California sur, Mexico. En *Socio-ecological Studies in Natural Protected Areas* (pp. 425–439). Springer International Publishing.

- Cariño, M., Breceda, A., Ortega A., and Castorena, L. (Eds.). 2013. Evocando al Edén: Conocimiento, valoración y problemática del oasis de Los Comondú. Icaria, Barcelona, 544 pp.
- Collantes F. 2003. La ganadería de montaña en España, 1865-2000: Historia de una ventaja comparativa anulada. *Historia Agraria* 31: 141-167.
- Collantes F. 2007. The Decline of Agrarian Societies in the European Countryside: A Case Study of Spain in the Twentieth Century. *Agricultural History* 81(1): 76-97.
- FAO 1996. World Livestock Production Systems: Current Status, Issues and Trends. Animal production and health paper Num. 127, Rome.
- Garcia-Barrios, L., Cruz-Morales, J., Vandermeer, J., Perfecto, I., 2017. The Azteca Chess experience: learning how to share concepts of ecological complexity with small coffee farmers. *Ecology and Society*, 22: # 37.
- García-Barrios, L., García-Barrios, R., Cruz-Morales, J., Smith, J.A.. 2015. When death approaches: reverting or exploiting emergent inequity in a complex land-use table-board game. *Ecology and Society*, 20: #13.
- Haag D. Kaupenjohann M. 2001. Parameters, prediction, post-normal science, and the precautionary principle – a roadmap for modelling for decision-making. *Ecological Modelling* 144: 45-60.
- Holling, C. S. (2017). Resilience and stability of ecological systems (1973). En *The Future of Nature* (pp. 245–260). Yale University Press.
- IFAD (2016) *The Drylands Advantage. Protecting the environment, empowering people.* International Fund for Agricultural Development, Rome.
- IPBES 2020. Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4147317>

- IPCC 2019. Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Janssen, M. A., J. M. Anderies, and E. Ostrom. 2007. Robustness of Social-Ecological Systems to Spatial and Temporal Variability. *Society and Natural Resources* 20: 1–16
- McManus, P., Walmsley, J., Argent, N., Baum, S., Bourke, L., Martin, J., Pritchard, B., & Sorensen, T. (2012). Rural Community and Rural Resilience: What is important to farmers in keeping their country towns alive? *Journal of Rural Studies*, 28(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2011.09.003>
- Meinzen-Dick, R., Janssen, M. A., Kandikuppa, S., Chaturvedi, R., Rao, K., & Theis, S. (2018). Playing games to save water: Collective action games for groundwater management in Andhra Pradesh, India. *World Development*, 107, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.006>
- Meinzen-Dick, R., R. Chaturvedi, L. Domènech, R. Ghate, M. A. Janssen, N. D. Rollins, and K. Sandeep. 2016. Games for groundwater governance: field experiments in Andhra Pradesh, India. *Ecology and Society* 21(3):38.
- Meuwissen, M.P.M., et al., 2019. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems* 176: #102656.
- Miralles, G. (2019, junio 19). Sistemas socioecológicos. SARAS Institute. <https://saras-institute.org/es/sistemas-socioecologicos/>
- Palomo I, Martín-López B, López-Santiago C, Montes C (2011) Participatory scenario planning for protected areas management under the ecosystem services framework: the doñana social ecological system in southwestern Spain. *Ecology and Society* 16: #23.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., et al., 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14: #32.

- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., y Woznicki, S. A. 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and Mitigation. *Climate Risk Management* 16: 145–163.
- Speelman, E.N., García-Barrios, L.E., Groot, J.C.J., Tiftonell, P. 2014. Gaming for smallholder participation in the design of more sustainable agricultural landscapes. *Agricultural Systems* 126: 62-75.
- Steffen W., et al. 2011. The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship. *AMBIO* 40: 739-761.
- Tenza-Peral A, Beraud-Macías V, Pérez-Ibarra I, Breceda A, Martínez-Fernández J, Giménez A. 2020. Dynamic simulation models and participatory approaches to support the sustainable management of social-ecological systems in Natural Protected Areas. En: Ortega A (Ed.) *Socio-ecological studies in natural protected areas: Linking community development and conservation in Mexico*. Springer. pp. 121-131. doi: 10.1007/978-3-030-47264-1
- Tenza, A., Martínez-Fernández, J., Pérez-Ibarra, I., & Giménez, A. (2019). Sustainability of small-scale social-ecological systems in arid environments: trade-off and synergies of global and regional changes. *Sustainability Science*, 14(3), 791–807. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0646-2>
- Tenza, A., Pérez, I., Martínez-Fernández, J., & Giménez, A. (2017). Understanding the decline and resilience loss of a long-lived social-ecological system: insights from system dynamics. *Ecology and society: a journal of integrative science for resilience and sustainability*, 22(2). <https://doi.org/10.5751/es-09176-220215>
- Vennix JAM (1996) *Group Model Building. Facilitating team learning using system dynamics*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.
- Walker, B. 2020. Resilience: what it is and is not. *Ecology and Society* 25: #11. <https://doi.org/10.5751/ES-11647-250211>