



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola
Programa de Doctorado en Recursos Hídricos y Energía para la Agricultura

Metodología para el Desarrollo de Escenarios Potenciales para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos de Cuencas

Tesis para optar al grado de Doctor en Recursos Hídricos y Energía para la Agricultura

PABLO ANDRÉ VELÁSQUEZ CISTERNA

CHILLÁN-CHILE
2025

Profesor Guía: Mario Lillo Saavedra
Dpto. de Mecanización y Energía
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Mecanización y Energía de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción

Profesor Guía

Dr. Mario Lillo Saavedra
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora:

Dr. Diego Rivera Salazar
Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo

Dra. Marcela Salgado Vargas
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

Dr. Marcelo Somos Valenzuela
Facultad de Ciencias Agropecuarias
y Medio Ambiente
Universidad de la Frontera

Director de Programa

Dr. Sebastián Krog Navarro
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Agradecimientos

Este trabajo de tesis fue posible gracias al financiamiento de la Beca de Doctorado Nacional 2020 21200925, el proyecto Fondecyt Regular No. 1230312, y los gastos operacionales 2022, en conjunto con el proyecto ANID/FONDAP/15130015. Agradezco también a la Universidad de Concepción por brindarme acceso a las instalaciones y recursos profesionales necesarios para la realización de este estudio.

Quiero expresar mi gratitud a la Junta de Vigilancia del Río Longaví (JVRL) por su valiosa contribución en la construcción de este conocimiento.

Finalmente, agradezco a todas las personas, mascotas que me acompañaron y apoyaron durante mis estudios, así como a aquellos que ya no están con nosotros.

Dedicatoria

Para ti, que siempre lo supiste: ahora estamos más cerca.

Resumen

Esta tesis desarrolla una metodología para identificar y gestionar conflictos en la gestión de recursos hídricos a escala de cuenca, con un enfoque particular en la cuenca del río Longaví en la región del Maule, Chile. La región enfrenta desafíos significativos debido a la fragmentación de la tierra y la variabilidad hídrica, exacerbados por el cambio climático. Para abordar estos problemas, se integra la socio-hidrología con Modelos Basados en Agentes (SHABM), permitiendo un análisis detallado de las interacciones entre los usuarios del agua.

La herramienta tecnológica desarrollada en este estudio utiliza *Python* y *MongoDB* para simular y analizar estas interacciones, considerando variables como uso del suelo, demanda hídrica y factores económicos. Los datos recolectados mediante entrevistas, observaciones y encuestas ayudan a alimentar los modelos de simulación, permitiendo examinar cómo diferentes tipos de usuarios con comportamientos egoístas, neutrales y colaboradores toman decisiones bajo diversas condiciones de disponibilidad y supervisión.

Los resultados muestran cómo los patrones de decisión varían según los niveles de supervisión y la disponibilidad de agua, destacando diferencias en el comportamiento de riego entre los distintos tipos de usuarios. Estos hallazgos ofrecen perspectivas para la formulación de estrategias de gestión adaptativa del agua, promoviendo la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región.

Además, este estudio sugiere nuevas direcciones para investigaciones futuras, inclu-

yendo la ampliación del análisis de datos sociales para comprender mejor los sistemas sociales complejos que influyen en la gestión hídrica. También se recomienda explorar enfoques interdisciplinarios que mejoren la precisión de las simulaciones de sistemas socio-hidrológicos, lo cual podría ayudar a diseñar políticas y estrategias de gestión más efectivas en el contexto de cambio climático.

Este trabajo de tesis contribuye al conocimiento de la socio-hidrología y gestión de recursos hídricos, ofreciendo un modelo práctico y replicable para identificar y gestionar conflictos hídricos a escala de cuenca, facilitando una gestión del agua bajo condiciones de cambio climático, variabilidad hídrica y/o cambios sociales.

Abstract

This thesis develops a methodology for identifying and managing conflicts in water resource management at the basin scale, with a particular focus on the Longaví River basin in the Maule region, Chile. The region faces significant challenges due to land fragmentation and water variability, exacerbated by climate change. To address these issues, socio-hydrology is integrated with Agent-Based Models (ABM), allowing for a detailed analysis of the interactions among water users.

The technological tool developed in this study uses *Python* and *MongoDB* to simulate and analyze these interactions, considering variables such as land use, water demand, and economic factors. Data collected through interviews, observations, and surveys help feed the simulation models, allowing for the examination of how different types of users with selfish, neutral, and collaborative behaviors make decisions under various conditions of availability and supervision.

The results show how decision patterns vary according to the levels of supervision and water availability, highlighting differences in irrigation behavior among different types of users. These findings provide insights for the formulation of adaptive water management strategies, promoting the sustainability of water resources in the region.

Moreover, this study suggests new directions for future research, including the expansion of social data analysis to better understand the complex social systems that influence water management. It also recommends exploring interdisciplinary approa-

ches that enhance the accuracy of socio-hydrological system simulations, which could help design more effective management policies and strategies in the context of climate change.

This thesis work contributes to the field of socio-hydrology and water resource management, offering a practical and replicable model for identifying and managing water conflicts at the basin scale, facilitating water management under conditions of climate change, water variability, and/or social changes.

Índice general

Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	1
Hipótesis	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
1 Modelo Socio-Hidrológico Basado en Agentes	10
1.1 Introducción	10
1.2 Modelo Propuesto	13
2 Desarrollo e Implementación de la Herramienta para la Simulación del Modelo SHABM	32
2.1 Introducción	32
2.2 Escenarios de Simulación	35
2.3 Metodología y Estructura de Datos	36
2.4 Estructura Conceptual	38
2.4.1 Lenguaje de programación y base datos	38
2.4.2 Simulación Basada en Agentes	39
2.4.3 Recolección de Datos Sociales	40
2.4.4 Validación del Modelo	41
2.5 Requerimientos Conceptuales y de Información	42
2.5.1 Elementos Iniciales	43
2.6 Requerimientos Técnicos	44
2.6.1 Ecuaciones para el Cálculo de Tasas de Distribución	44
2.7 Implementación	45
2.7.1 Procesamiento	47
3 Resultados	49
3.1 Contexto de Simulación y Caracterización del Área de Estudio	49
3.1.1 Características Geográficas y Socioeconómicas del Sitio de Estudio	50
3.1.2 Gestión del Agua	53
3.1.3 Metodología y Datos de la Simulación	53
3.2 Análisis de Resultados de la Simulación	58

3.2.1	Influencia de la Supervisión y Disponibilidad Hídrica	58
3.2.2	Dinámicas Espaciales y Conflictos Potenciales	60
4	Discusión	65
4.1	Limitaciones y trabajos futuros	71

Índice de figuras

1	Evolución conceptual de la socio-hidrología a lo largo del tiempo. Adaptado de Xia, Dong y Zou (2022).	4
2	Marco de Trabajo Multidisciplinar.	5
3	Dinámica del flujo de agua en una bocatoma y su distribución entre usuarios. Se muestran los principales actores del sistema: Mesa Directiva (WB), Administrador del Canal (CA) y Agricultores (F), así como las interacciones entre ellos en la asignación y uso del recurso hídrico.	14
4	Esquema del flujo metodológico para el modelo SHABM	34
5	Esquema de la herramienta y la base de datos MongoDB.	42
6	Flujo de información en la herramienta tecnológica.	47
7	El sitio de estudio está ubicado en la cuenca del río Longaví, Región del Maule, Chile ($36^{\circ}08' S$, $71^{\circ}40' W$). La Junta de Vigilancia del Río Longaví (JVRL) gestiona 22 canales principales del río Longaví, incluyendo el canal principal “Primera Abajo”.	51
8	OUAs del canal principal “Primera Abajo” donde se aplicó el modelo SHABM.	54
9	Evolución temporal del caudal disponible y la demanda hídrica potencial de todos los cultivos en cada una de las OUAs estudiadas.	57
10	Relación entre personalidad y cumplimiento de turnos bajo variadas condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica.	59
11	Evolución temporal de las decisiones bajo distintos niveles de supervisión.	60
12	Mapa de la densidad de turnos de riego ignorados, indicando áreas potenciales de conflicto.	61
13	Influencia de los Agentes F bajo distintas condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica.	62

Índice de Tablas

1	Aspectos Económicos que Influyen en la Selección de Cultivos	25
2	Atributos del Shapefile	43
3	Patrón de cultivos utilizado durante los 5 años de simulación para cada OUA. .	55
4	Resumen de Aspectos Económicos y de Producción de los Cultivos.	55
5	Influencia entre Turnos en OUA 1	63

Introducción

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los recursos naturales, especialmente los hídricos. Este fenómeno global ha intensificado tanto la frecuencia como la severidad de eventos extremos, tales como sequías prolongadas y lluvias intensas, afectando no solo a los ecosistemas, sino también a las comunidades humanas (IPCC, 2023; FAO, 2022).

En Chile, estas alteraciones han generado tensiones entre los usuarios del agua, especialmente los relacionados con la agricultura. La coexistencia de grandes agroexportadoras con infraestructura avanzada y pequeños agricultores que dependen de las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA) refleja una realidad compleja donde el acceso al agua es a menudo desigual y fuente de conflictos (Valdés-Pineda et al., 2014; Mundial, 2011; Barlow, 2010; Guillermo Donoso, Lictévout y Rinaudo, 2020; Rivera et al., 2016; Budds, 2013; Prieto et al., 2015).

Para abordar estos retos de manera efectiva, es crucial emplear un enfoque multidisciplinario que integre diversas metodologías de análisis y simulación. Los Modelos Basados en Agentes (ABM) son especialmente relevantes por su capacidad para simular decisiones individuales y su impacto en sistemas complejos, lo que permite un análisis detallado de las dinámicas sociales que afectan la gestión de los recursos hídricos (Epstein, 2002). Sin embargo, para obtener una comprensión completa de estos sistemas, es necesario comparar y posiblemente integrar los ABM con otros enfoques metodológicos:

Comparación con Modelos de Sistemas Dinámicos: Los Modelos de Sistemas Dinámicos utilizan ecuaciones diferenciales para modelar cambios continuos a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión macroscópica que complementa la granularidad de los ABM, esenciales para entender tendencias y patrones a nivel del sistema (Sterman, 2000).

Ventajas de la Simulación de Monte Carlo: Esta técnica es reconocida por su capacidad para manejar la incertidumbre y evaluar la variabilidad de los resultados bajo diferentes escenarios, lo cual es crucial en la gestión de recursos hídricos para calcular probabilidades de eventos críticos, complementando así la predicción y planificación proporcionada por los ABM (Rubinstein y Kroese, 2016).

Modelos de Equilibrio General Computable: Estos modelos pueden integrarse para evaluar los impactos económicos y sociales de las políticas de gestión del agua. Predominantemente utilizados en economía, su aplicación en estudios socio-hidrológicos ayuda a anticipar las consecuencias económicas de las decisiones ambientales, proporcionando un contexto más amplio para las simulaciones detalladas de los ABM (Löfgren, Robinson y El-Said, 2002).

El marco económico y social en Chile, modificado por cambios legislativos desde la implementación del Código de Aguas en 1981, ha redefinido la dinámica de los recursos hídricos. Las OUA, estructuradas en juntas de vigilancia, asociaciones de canalistas y comunidades de agua, enfrentan desafíos crecientes en un entorno marcado por el cambio climático y una competencia intensificada por recursos limitados. Estas organizaciones son fundamentales para mediar en los conflictos y administrar el agua entre grupos con variados niveles de poder y acceso (Bauer, 2004).

Este contexto complejo se agrava por la diversidad de la economía agrícola, que abarca desde la agricultura de subsistencia hasta la agroindustria orientada a la exportación. Esta gama de actividades económicas conlleva diferentes demandas sobre los

recursos hídricos, intensificando la extracción de agua en muchas áreas y reduciendo la disponibilidad para los agricultores más pequeños y las comunidades locales. Además, los desafíos sociales, incluyendo la migración rural-urbana y la transformación de las prácticas agrícolas, han llevado a cambios significativos en las estructuras comunitarias y las formas de vida, exigiendo enfoques de gestión del agua que consideren tanto las demandas físicas del recurso como las dinámicas humanas que influyen su uso y distribución (Wester, 2008; Varady, Morehouse y O'Brien, 2008).

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) se presenta como un enfoque holístico destinado a coordinar la administración del agua, la tierra y otros recursos asociados, con el objetivo de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership, 2000). Sin embargo, la implementación efectiva de la GIRH enfrenta barreras significativas, especialmente debido a la notable desconexión entre los principios teóricos y su ejecución práctica. Los modelos teóricos de la GIRH frecuentemente no resultan en intervenciones prácticas efectivas, debido a limitaciones como la escasez de recursos financieros y técnicos, resistencia institucional al cambio, y la gestión compleja de intereses divergentes entre distintos grupos de usuarios (Pahl-Wostl y Jeffrey, 2019; Jeffrey y Gearey, 2021). A pesar de que muchos planes de gestión del agua basados en la GIRH abogan por la modernización de las infraestructuras y la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles, la realización plena de estos cambios es infrecuente debido a la inversión gubernamental insuficiente, la deficiencia en la capacitación técnica de los agricultores, y la influencia de poderosos lobbies agrícolas que prefieren mantener el status quo, inhibiendo así el progreso hacia una gestión del agua más sostenible y equitativa (Connor y A. Smith, 2018; J. M. Smith, 2020).

Desde 2012, la emergencia de la socio-hidrología ha permitido una integración más profunda de las dimensiones sociales, económicas y ambientales en el estudio de los sistemas hídricos, reconociendo las interacciones dinámicas entre las actividades humanas y los sistemas de agua. Este enfoque interdisciplinario, impulsado por Sivapalan,

Savenije y Blöschl (2012), destaca la necesidad de comprender y gestionar de manera integral los efectos del cambio climático y las actividades humanas sobre los recursos hídricos (Blair y Buytaert, 2016; Pande y Sivapalan, 2017).

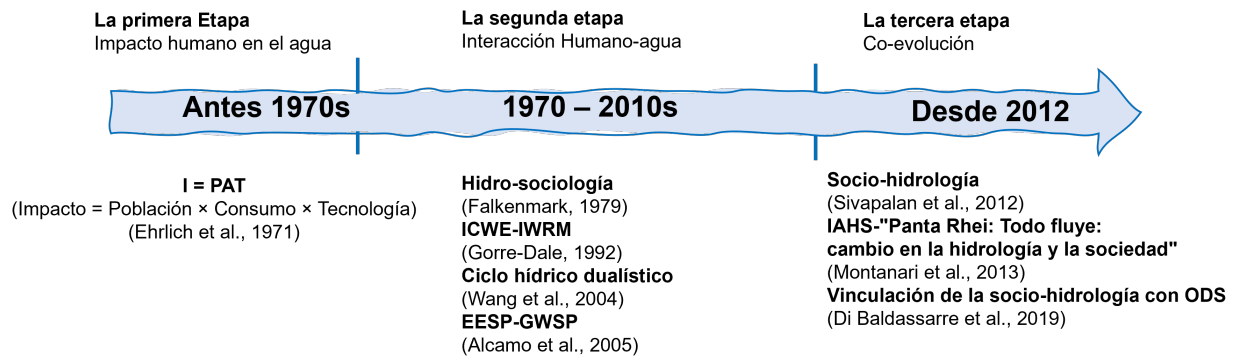


Figura 1: Evolución conceptual de la socio-hidrología a lo largo del tiempo. Adaptado de Xia, Dong y Zou (2022).

Fuente: Elaboración propia.

En los últimos años, la investigación en socio-hidrología ha evolucionado significativamente con la incorporación de modelos basados en agentes (ABM) para analizar las dinámicas de interacción humano-agua. Estudios recientes, como Roy et al. (2024), han explorado cómo el aprendizaje por refuerzo puede ser utilizado para simular decisiones humanas en sistemas complejos, subrayando el impacto de las interacciones individuales en la sostenibilidad colectiva.

En este contexto, los Modelos Basados en Agentes (MBA) se presentan como una herramienta para analizar el comportamiento de los usuarios del agua y su interacción con el entorno bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica. Estos modelos permiten una visión detallada de cómo las decisiones individuales y colectivas afectan la sostenibilidad de los recursos hídricos y apoyan la gestión integrada y adaptativa de los mismos (Elshafei et al., 2014; L. Guo et al., 2023).

El objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología para identificar conflictos en la gestión de recursos hídricos en cuencas agrícolas, combinando la socio-hidrología con modelos basados en agentes (SHABM). Este enfoque se centra en analizar las interacciones entre los seres humanos y los sistemas hídricos, y propone identificar

estrategias efectivas para afrontar los desafíos de la gestión del agua bajo el contexto de incertidumbres climáticas y sociales.

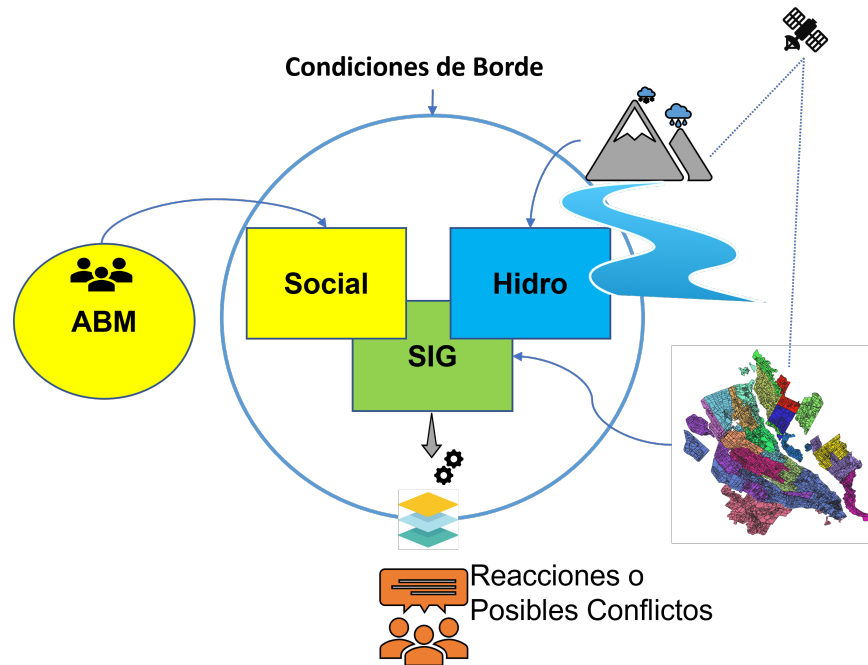


Figura 2: Marco de Trabajo Multidisciplinario.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 presenta el Marco de Trabajo Multidisciplinario que apoya esta investigación, destacando la integración de los aspectos sociales, hidrológicos y de modelado junto con la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este marco facilita una comprensión profunda de cómo las decisiones individuales y colectivas influyen en los sistemas hídricos y respalda la gestión adaptativa de los mismos en la cuenca. Al estudiar la dinámica entre los componentes del modelo, se pueden prever y gestionar los conflictos emergentes, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas en la gestión de los recursos hídricos.

Descripción del estudio

En esta tesis se examina la gestión de recursos hídricos en cuencas agrícolas mediante la integración de socio-hidrología y Modelos Basados en Agentes (MBA), abordando cómo los comportamientos humanos influyen y son influenciados por la disponibilidad

y regulación del agua. Se emplea un enfoque multidisciplinario para analizar y simular las dinámicas complejas entre los agentes humanos y los sistemas hídricos, con el objetivo de ofrecer estrategias efectivas para enfrentar los retos actuales y futuros en la gestión del agua.

Se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 1: Descripción del Sitio de Estudio, Conceptos Fundamentales y Modelo Conceptual

En este capítulo establece el marco teórico y conceptual de la investigación. Introduce la socio-hidrología como una disciplina emergente que integra aspectos sociales, económicos y ambientales en el análisis de sistemas hídricos. Además, describe el sitio de estudio específico: la cuenca del río Longaví en la región del Maule, Chile. Se aborda su importancia agrícola, las características geográficas y climáticas, y los desafíos relacionados con la gestión del agua. El modelo conceptual de socio-hidrología aplicado en la investigación se explica en detalle, introduciendo los fundamentos de los Modelos Basados en Agentes (MBA) que se utilizan para simular la interacción entre los agentes y su entorno.

Capítulo 2: Implementación del Modelo, Desarrollo del SHABM y Estructura de su Base de Datos

Este capítulo detalla el desarrollo e implementación del Modelo Basado en Agentes para la socio-hidrología (SHABM), describiendo los algoritmos y las estructuras de datos empleadas. Se explica cómo se modelaron los agentes, sus decisiones y interacciones dentro del sistema hídrico. También se describen las técnicas de recopilación de datos y cómo se estructuró la base de datos para soportar el modelo, garantizando que el sistema pueda manejar eficientemente la información necesaria para las simulaciones.

Capítulo 3: Resultados de los Escenarios Propuestos

El capítulo analiza los resultados obtenidos de aplicar el SHABM en diversos escenarios de supervisión y disponibilidad hídrica. Muestra cómo las decisiones de los agentes afectan la sostenibilidad de los recursos hídricos y cómo las políticas de gestión pueden influir en estos comportamientos. Este capítulo utiliza visualizaciones y análisis estadísticos para interpretar los patrones y tendencias observadas en las simulaciones, proporcionando una base empírica sólida para las discusiones posteriores.

Capítulo 4: Discusión

Este capítulo discute los hallazgos en el contexto de la literatura existente sobre gestión de recursos hídricos y socio-hidrología. Evalúa críticamente la efectividad del modelo SHABM, considerando tanto sus fortalezas como sus limitaciones. Se debaten las implicaciones de los resultados para la política y la práctica de la gestión del agua, destacando cómo el enfoque integrado puede ofrecer nuevas perspectivas y soluciones a los problemas de recursos hídricos en Chile y otras regiones similares.

Capítulo 5: Conclusiones, Limitaciones y Propuestas para Trabajos Futuros

El último capítulo resume las principales conclusiones de la investigación, subrayando la contribución del estudio al campo de la socio-hidrología y la gestión de recursos hídricos. Se reconocen las limitaciones del estudio, que pueden incluir la generalización de los resultados y las suposiciones del modelo. Finalmente, se sugieren áreas para investigaciones futuras, incluyendo la adaptación del modelo para otros contextos, la integración de más variables socio-económicas y ambientales, y la aplicación de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial para mejorar la modelización y la toma de decisiones.

De esta manera la investigación contribuye tanto al conocimiento teórico sobre

las interacciones entre sistemas humanos y recursos hídricos como al desarrollo de herramientas prácticas para la gestión en cuencas agrícolas. Al explorar la coevolución de las relaciones humano-agua en distintos escenarios, este trabajo respalda la toma de decisiones informadas en contextos de escasez hídrica y posibles conflictos (T. Huber y J. Smith, 2022; H. Zhang y Wang, 2023). Asimismo, la integración de SHABM facilita la simulación y análisis de las intervenciones en la gestión de recursos, promoviendo estrategias más efectivas para una gestión adaptativa y sostenible.

Hipótesis

Se espera que la integración de modelos socio-hidrológicos y Modelos Basados en Agentes (ABM) mejore la capacidad de identificar y predecir conflictos por el uso del agua en cuencas hidrográficas bajo condiciones de supervisión limitada y disponibilidad reducida de agua. Este enfoque teórico, aplicado mediante simulaciones detalladas, se anticipa que fortalecerá significativamente el proceso de toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

Objetivo General

Identificar conflictos potenciales por el agua a escala de cuenca utilizando socio-hidrología y modelos basados en agentes (SHABM).

Objetivos Específicos

- Diseñar un marco teórico para aplicar SHABM.
- Desarrollar escenarios para evaluar futuros conflictos por el agua utilizando la herramienta desarrollada para replicar el modelo SHABM.
- Evaluar un SHABM en una comunidad de usuarios de agua del mundo real.

Capítulo 1

Modelo Socio-Hidrológico Basado en Agentes

1.1. Introducción

La gestión de cuencas hidrográficas se ve afectada por diversas estructuras de gobernanza y acciones humanas multidimensionales que abarcan aspectos biofísicos, tecnológicos, sociales, culturales y políticos (Wei et al., 2022; Kumar, Dasgupta y Avtar, 2022), configurando espacios donde interactúan elementos sociales y naturales, en lo que se denomina territorios hidro-sociales (Fragaszy, McDonnell y Closas, 2021; Boelens et al., 2017; Gain et al., 2021). En este contexto, es relevante comprender cómo las dinámicas de co-evolución y las complejas interacciones entre seres humanos y recursos hídricos afectan el acceso al agua y la toma de decisiones relacionadas con su distribución.

En el trabajo desarrollado por Sivapalan, Savenije y Blöschl (2012) y Sivapalan, Konar et al. (2014), los autores propusieron el concepto de socio-hidrología para estudiar explícitamente, y de forma cuantitativa, el modo en que evoluciona el sistema acoplado humano-agua, y las diferentes trayectorias de su co-evolución, incluida la posibilidad de generar comportamientos emergentes (Shanono, 2021; Gain et al., 2021). Así, al ser la socio-hidrología una aproximación metodológica que permite comprender

cómo las decisiones y acciones humanas influyen en los recursos hídricos y viceversa, se convierte en una valiosa herramienta para el desarrollo e implementación de estrategias efectivas de gestión de recursos hídricos, contribuyendo así a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (Gu et al., 2021).

Por otra parte, la integración de modelos socio-hidrológicos con modelos basados en agentes (ABM) ofrece una sinergia para abordar la complejidad de los sistemas hídricos (Schulze et al., 2023; Ghoreishi, Razavi y Elshorbagy, 2021). Mientras que los modelos socio-hidrológicos proporcionan un marco para entender las interacciones a nivel macro entre los sistemas humanos y de agua (James y Bradshaw, 2023; Di Baldassarre et al., 2019), los ABM permiten una representación detallada de las decisiones y comportamientos individuales que dan lugar a estos patrones macro (Schlüter, Müller y Frank, 2019). Esta combinación permite capturar tanto las dinámicas emergentes a nivel de sistema como los procesos de toma de decisiones a nivel individual que las impulsan.

Algunos trabajos relevantes en este sentido son, por ejemplo, el de L. Huber, Bahro et al. (2018), donde los autores demostraron cómo la integración de ABM en modelos socio-hidrológicos (socio-hydrological agent based modelling -SHABM-) puede mejorar la comprensión de las respuestas adaptativas de los agricultores a la escasez de agua. En L. Huber, Rüdisser et al. (2021), se centraron en la evaluación de la escasez de agua en la región de los Alpes, utilizando para ello una modelización SHABM llamada Aqua.MORE, cuya principal contribución radicó en su análisis del comportamiento y las interacciones en el sistema humano-agua. Los investigadores llegaron a la conclusión de que al combinar datos de escorrentía anual, datos de escorrentía local y escenarios de cambio de uso del suelo con un SHABM, se logra la capacidad de prever la posible escasez de agua en escenarios futuros. En N. Guo et al. (2022), los autores simulaban sistemas de usuarios de agua agrícola bajo una política de compensación por ahorro de agua, analizando la influencia de la sensibilidad y la capacidad de aprendizaje de los agentes en ingresos agrícolas y consumo de agua en el hogar en

el contexto de un programa de subvenciones. Una de las principales conclusiones del trabajo es que los modelos ABM, al incorporar factores como la sensibilidad de los agricultores, su capacidad de aprendizaje y su acceso a la información, proporcionan una comprensión más profunda y matizada de los sistemas socio-hidrológicos que los enfoques tradicionales top-down, ofreciendo así información valiosa para la toma de decisiones en la gestión sostenible del agua.

Así, la fusión de estos enfoques permite una representación multidimensional de los sistemas complejos, facilitando la exploración de escenarios futuros y la identificación de intervenciones potenciales más efectivas y sostenibles (Elsawah et al., 2020)

A pesar de los significativos avances logrados mediante la implementación de los ABM, se mantiene una marcada diferencia entre los resultados obtenidos en estudios teóricos y su aplicación práctica en la gestión del agua en el mundo real (An, Grimm et al., 2021). Esta diferencia plantea desafíos constantes en lo que respecta a la validación de los modelos y a la comunicación efectiva de los descubrimientos a los responsables de la toma de decisiones y otras partes interesadas. La resolución de esta brecha se convierte en un aspecto esencial para aprovechar al máximo el potencial de los ABM en la gestión del agua, desde una perspectiva multidimensional, y para facilitar la adopción de decisiones más informadas y sostenibles en este ámbito crítico.

En un contexto de recursos hídricos limitados, la anticipación y gestión de conflictos asociados al agua se torna imperativa. El presente trabajo se estudia la co-evolución temporal de los sistemas socio-hidrológico. Para facilitar este análisis, se implementó un Modelo Basado en Agentes (ABM) que permite la identificación y análisis de conflictos hídricos en territorios hidro-sociales específicos, tanto en el tiempo como espacio, considerando variables como la supervisión administrativa de los canales de distribución.

La metodología incorpora elementos precursores de conflictos, incluyendo la ca-

racterización de la personalidad de los agentes, la infraestructura hídrica y la tipología de cultivos. El diferencial entre oferta y demanda hídrica se utiliza como catalizador de las reacciones e interacciones entre agentes. Este tipo de herramientas permite generar información que sustente la toma de decisiones en un contexto de recursos limitados, donde las asimetrías en el acceso al agua exacerbaban las tensiones entre los diversos actores y los tomadores de decisiones.

1.2. Modelo Propuesto

Esta Tesis presenta un enfoque integrado que combina trabajo de campo y modelado basado en agentes (ABM) para analizar las dinámicas de los conflictos por el agua en sistemas socio-hidrológicos. El objetivo central es identificar y comprender las interacciones entre usuarios del agua en el contexto de las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUAs), resaltando cómo las decisiones individuales impactan la gestión colectiva del recurso hídrico. La metodología adoptada se estructura en tres componentes principales: (i) la caracterización del sitio de estudio, (ii) la recolección de datos mediante trabajo de campo, y (iii) el desarrollo de un modelo socio-hidrológico basado en agentes (SHABM).

El modelo considera las interacciones entre los elementos del sistema (Fig.3): (i) la Mesa Directiva (WB), que gestiona la asignación y distribución de agua entregando tasas volumétricas a cada canal; (ii) el Administrador del Canal (CA), responsable de distribuir las tasas asignadas entre los agricultores de acuerdo con sus derechos de aprovechamiento de agua (DAA); y (iii) los Agricultores (F), quienes, como usuarios finales del agua, toman decisiones sobre respetar o ignorar los turnos de riego asignados.

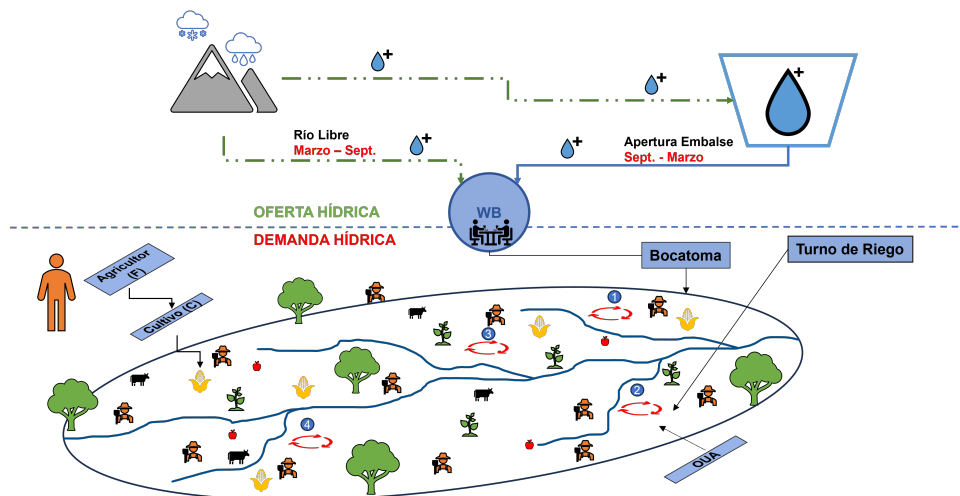


Figura 3: Dinámica del flujo de agua en una bocatoma y su distribución entre usuarios. Se muestran los principales actores del sistema: Mesa Directiva (WB), Administrador del Canal (CA) y Agricultores (F), así como las interacciones entre ellos en la asignación y uso del recurso hídrico.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo adopta un enfoque bottom-up, donde las dinámicas del sistema emergen a partir de las decisiones individuales de los agricultores. Estas decisiones, influenciadas por factores económicos, sociales y estructurales, se agregan para formar patrones de comportamiento colectivo que reflejan potenciales áreas de conflicto. Este enfoque permite capturar la heterogeneidad de los agricultores y cómo sus acciones individuales influyen en la gestión del agua a escala de la cuenca.

Para garantizar que el modelo represente las dinámicas del sistema, el SHABM utiliza el protocolo **ODD** (*Overview, Design concepts, and Details*), un estándar ampliamente aceptado que garantiza la transparencia, reproducibilidad y claridad en la descripción de modelos complejos (Grimm, Urs Berger, Bastiansen et al., 2006; Grimm, Urs Berger, Donald L. DeAngelis et al., 2010). Este protocolo organiza el modelo en tres componentes principales que se describen a continuación:

Overview: Visión general

El protocolo ODD comienza con la *Visión general*, que proporciona un panorama general del modelo, enfocándose en su propósito principal, las entidades involucradas y las escalas espaciales y temporales. Este componente establece el contexto y los objetivos del modelo, permitiendo comprender las dinámicas centrales que se buscan representar. En este caso, el modelo socio-hidrológico analiza las interacciones entre actores como la Mesa Directiva, el Administrador del Canal y los agricultores, quienes operan dentro de una escala espacial definida por la red de canales de riego y una escala temporal basada en la temporada agrícola. Según Grimm, Urs Berger, Bastiansen et al. (2006), esta sección es crucial para identificar cómo el modelo refleja las dinámicas reales del sistema estudiado.

El **propósito** del modelo busca simular las dinámicas de distribución del agua, evaluando cómo las decisiones individuales y colectivas de los agentes afectan la disponibilidad hídrica. Para ello, se identifican patrones emergentes de comportamiento, como los incumplimientos de turnos de riego, y analizar las implicancias de distintos niveles de supervisión y escenarios de disponibilidad hídrica. Esto se aborda a través de la simulación de tres escenarios específicos: una condición de disponibilidad normal, que representa un estado promedio de los recursos hídricos; una condición con 20 % menos de disponibilidad, que refleja situaciones de escasez hídrica; y una condición con 20 % más de disponibilidad, que simula un escenario de abundancia relativa.

El modelo incluye **Entidades, variables de estado y escalas** que estructuran las interacciones del sistema. La primera es la **Mesa Directiva (WB)**, encargada de asignar las tasas de riego a cada canal en función de la disponibilidad hídrica del embalse. Específicamente en el contexto de la Junta de Vigilancia del Río. Entre sus responsabilidades se encuentra la administración del embalse y la distribución de las tasas volumétricas que le corresponden a cada Bocatoma.

- **Variables:** Nombre, Acciones, Tipo_{Canal}, Embalse_{max}, Embalse_{min}, Semana_{Apertura} y Tasas_{Mesa}.
- **Variables de estado:** Tasas_{Mesa}, muestra el cambio de tasas en el tiempo que puede ser modificada según requerimientos de la Junta de Vigilancia.

La segunda es el **Administrador del Canal (CA)**, que distribuye las tasas asignadas entre los agricultores, supervisa el cumplimiento de las reglas y aplica sanciones en caso de infracciones. Su función principal consiste el repartir las tasas recibidas y entregarlas a los Agricultores basándose en los DAA que posee.

- **Variables de entrada:** Nombre_{Bocatoma}, Datos_{Agricultor}, Tasas_{Reparto}.
- **Variables de estado:** Gestiona la información entre los Usuarios del agua, fiscaliza y sanciona (Arriagada Puentes, 2018).

Finalmente, están los **Agentes (F)**, quienes, como usuarios finales del agua, toman decisiones individuales sobre respetar o ignorar los turnos de riego asignados, considerando factores como la rentabilidad del cultivo, sus percepciones personales y las normativas aplicadas. Este agente recibe las tasas de riego correspondiente a sus Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA) y se distinguen entre sí por su identificador de propietario llamado **Rol**. Se establece una asociación entre el F y su parcela mediante el (Id_{Parcela}). Además, recibe información adicional desde la conexión a la base de datos, como datos relacionados a su personalidad, posición (sección) en la red de canales y datos sobre el cultivo de su propiedad, costo de producción y valor de mercado entre otros.

- **Variables:** Rol, Id_{Parcela}, Grupo, Variedad, Superficie, Acciones, Bocatoma, Prioridad_{Crop}, Orden_{Turno}, Aplicacion_R, Personalidad, OUA, Dias_{Riego}.
- **Variables de estado:** Percepcion_F y las reacciones económicas, por infraestructura y por turno muestran el cambio en el tiempo de esta entidad. Sobre la cual se determina si el agente ignora el turno o no.

La entidad cultivo **Cultivo (C)** permite obtener información sobre la variedad, ubicación y reacción sobre sus necesidades hídricas, está estrechamente vinculada al F Agent mediante el identificador de parcela $Id_{parcela}$. La reacción del Cultivo se centra en la demanda diaria de agua, la cual se calcula con base en la evapotranspiración (ET) en milímetros por día ($mm \cdot dia^{-1}$) sobre la cual se realiza una transformación de unidades a $l \cdot s^{-1}$ para poder realizar los cálculos directos entre la tasa que recibe Agente F y la demanda de Agua del cultivo.

- **Variables:** $Id_{parcela}$, Latitud, Longitud, Variedad, $Demanda_{Crop}$.
- **Variables de estado:** $Conformidad_{Crop}$, basado en la diferencia entre las Tasas que recibe el F y la demanda del Cultivo.

Para la simulación del sistema socio-hidrológico el modelo tiene **Escalas Espaciales y Temporales**, la escala física se enmarca en el área de influencia del canal matriz de la bocatoma, el cual abarca una superficie determinada de hectáreas [ha] y posee un número de acciones equivalentes a los DAA de los F, donde la escala a analizar será a nivel de una Organización de Usuarios del Agua (OUA). Por otra parte, la unidad temporal donde ocurren las interacciones se denomina **Temporada Agrícola** que dura el número de semanas en las cuales el embalse se encuentra operativo y es donde ocurre la distribución de las tasas de riego diarias y cambios semanales expresadas en $l \cdot s^{-1}$ las cuales se modifican en función de disponibilidad de agua del embalse el cual posee un volumen de agua que fluctúa entre un máximo en m^3 y un volumen mínimo operacional (reserva) m^3 .

Design concepts: Conceptos de diseño

La sección de *Conceptos de diseño* detalla los principios teóricos y operativos que guían la construcción del modelo. Estos conceptos establecen el marco conceptual para analizar cómo las decisiones individuales de los agentes generan dinámicas emergentes en el sistema socio-hidrológico. Entre los elementos clave destacan la **emergencia**, que ilustra cómo las interacciones locales se convierten en patrones globales; la **adapta-**

ción, que refleja la capacidad de los agentes para responder a cambios en su entorno; y la **estocasticidad**, que introduce incertidumbre y realismo en el proceso de toma de decisiones. También se consideran la **interacción** entre agentes y la **observación** de variables clave como medio para evaluar los resultados del modelo. Este enfoque, basado en teorías como las descritas por Grimm, Urs Berger, Donald L. DeAngelis et al. (2010) y Steven F. Railsback y Grimm (2011), permite entender cómo decisiones individuales pueden generar patrones emergentes a nivel colectivo.

La gestión de recursos hídricos en sistemas socio-hidrológicos combina interacciones complejas entre agentes, infraestructura y condiciones naturales. Este modelo se centra en comprender cómo estas interacciones emergen y evolucionan durante una temporada de riego, abordando tanto las dinámicas de distribución del agua como los conflictos, aprendizajes y adaptaciones que surgen de las restricciones del sistema. Cada elemento del modelo está interconectado, formando un ciclo dinámico donde las decisiones individuales afectan y son afectadas por el entorno colectivo.

Principios Básicos: En el núcleo del modelo se encuentra la intención de replicar un sistema socio-hidrológico realista, donde las decisiones de los agentes están condicionadas por la oferta y demanda de agua. Estas interacciones sociales, ancladas en un entorno agrícola, permiten estudiar las dinámicas que ocurren durante una temporada de riego y su impacto en la gestión del recurso.

Emergencia: De estas interacciones surgen dinámicas globales que revelan patrones de comportamiento colectivo. Por ejemplo, los conflictos emergen como resultado de las tensiones entre las necesidades individuales de los agentes y las limitaciones del sistema. Estos patrones no solo reflejan la complejidad del sistema, sino que también permiten identificar cómo las decisiones individuales escalan para generar dinámicas colectivas que impactan la sostenibilidad del sistema.

Detección: La aparición de conflictos obliga a los agentes a evaluar factores clave

para ajustar sus decisiones. Estos factores incluyen la cantidad de agua recibida, el estado de apertura del embalse y la rentabilidad de los cultivos. Estas evaluaciones no solo guían las decisiones individuales, sino que también moldean las dinámicas colectivas, que están reguladas por mecanismos como la fiscalización y el cumplimiento de los turnos de riego. De esta manera, la detección actúa como un puente entre las tensiones del sistema y las decisiones operativas de los agentes.

Interacción: A medida que los agentes toman decisiones, se generan relaciones con otros actores del sistema, como el administrador del canal. Estas interacciones, influenciadas por el calendario agrícola y las reglas establecidas, son esenciales para garantizar el funcionamiento del sistema hídrico. Además, procesos como la supervisión, las sanciones y la cooperación conectan las decisiones locales de los agentes con el contexto global del sistema, reforzando la interdependencia entre los niveles individual y colectivo.

Adaptación: En este entorno dinámico, los agentes enfrentan restricciones y presiones que los llevan a desarrollar comportamientos adaptativos. Por ejemplo, ignorar un turno de riego puede convertirse en una estrategia de supervivencia cuando factores económicos o personales los empujan a priorizar la producción sobre la cooperación. Esta capacidad de adaptación permite a los agentes responder a las tensiones generadas por el sistema, equilibrando sus necesidades individuales con las restricciones colectivas.

Aprendizaje: Sin embargo, la adaptación no ocurre en aislamiento. Los agentes también aprenden de las consecuencias de sus decisiones, especialmente cuando enfrentan sanciones o supervisión. Este aprendizaje no solo modifica el comportamiento de los agentes a corto plazo, sino que también establece dinámicas en las que las decisiones pasadas condicionan las futuras. Así, el aprendizaje actúa como un mecanismo de retroalimentación que fomenta la evolución del sistema hacia mayor sostenibilidad.

Estocasticidad: A pesar de las estrategias adaptativas y del aprendizaje, los agentes operan en un entorno lleno de incertidumbre. Factores como el clima, las fluctuaciones del mercado y las tasas de riego están fuera del control de los agentes, lo que introduce un grado significativo de azar en sus decisiones. El modelo incorpora esta estocasticidad para reflejar la complejidad del entorno, permitiendo simular diferentes escenarios y configuraciones del sistema.

Colectivos: Aunque los agentes toman decisiones de manera individual, sus acciones están enmarcadas dentro de colectivos organizados en torno a bocatomas, conocidos como Organizaciones de Usuarios del Agua (OUA). Estas estructuras colectivas regulan el acceso al agua y la gestión de los turnos, moldeando las decisiones individuales a través de reglas comunes y limitaciones geográficas. Este equilibrio entre acción individual y dinámica colectiva es esencial para entender el funcionamiento del sistema.

Observación: Finalmente, las decisiones de los agentes están vinculadas al estado del embalse y a las tasas de riego disponibles, que proporcionan un marco clave para las acciones dentro del sistema. Mientras que el administrador del canal actúa como un gestor centralizado, los agentes, organizados en colectivos, mantienen su independencia en la toma de decisiones. Este equilibrio constante entre dinámicas individuales y colectivas refuerza la idea de un sistema interdependiente y adaptable.

Details: Detalles

La última sección del protocolo ODD, titulada **Detalles**, proporciona una explicación técnica exhaustiva del funcionamiento del modelo. Esta sección abarca las condiciones iniciales, los submodelos implementados y los procedimientos de simulación. Su objetivo principal es garantizar la reproducibilidad y transparencia del modelo, como sugieren Grimm, Urs Berger, Donald L. DeAngelis et al. (2010), para que otros investigadores puedan replicar y validar los resultados obtenidos. A continuación, se desarrollan las partes principales: inicialización, datos de entrada, submodelos y diná-

micas de decisión y respuesta.

Inicialización El modelo comienza con la configuración de los parámetros iniciales y la carga de datos esenciales que determinan el comportamiento de los agentes y las dinámicas del sistema. Las tasas de reparto, asignadas por la Mesa Directiva del Canal (WB), y las tasas de demanda hídrica específicas para cada cultivo se incorporan al sistema. Adicionalmente, se extrae información detallada de cada agricultor (F) desde una base de datos. Esta incluye el Rol del agricultor, la Bocatoma a la que pertenece su parcela, el número de acciones de agua asignadas, el cultivo asociado, el grupo al que pertenece, y las características de su parcela, como el identificador y la superficie.

Esta información también abarca variables relacionadas con la personalidad del agricultor y su relación con el cultivo: importancia asignada, días asignados al riego según el sistema de turnos, tecnología de aplicación de riego utilizada, y la pertenencia a una Organización de Usuarios del Agua (OUA). Estas variables se vinculan directamente con el orden y duración del riego en cada turno.

Datos de entrada

La construcción del modelo depende de información técnica, social y económica que permita simular las dinámicas del sistema con realismo. En el aspecto técnico, se incluyen datos sobre el uso del suelo para identificar los cultivos y su ubicación, así como la oferta de agua disponible y los valores de evapotranspiración (ET). Estos datos son esenciales para calcular la demanda diaria de agua de cada parcela y establecer las tasas de riego que regirán los cálculos de conformidad.

En términos sociales, la personalidad de los agricultores y sus preferencias se derivan de informes específicos. Esta información permite determinar cómo reaccionan ante las condiciones del sistema y las normativas. Finalmente, los datos económicos, como los costos de producción y los valores de mercado de los cultivos, se recopilan

previamente y sirven como base para modelar las decisiones y reacciones de los agentes.

Submodelos

El modelo integra submodelos diseñados para capturar las interacciones clave entre los agentes, sus parcelas y el sistema de riego, con un enfoque en la relación entre las tasas de reparto asignadas y las demandas hídricas de los cultivos. Estos submodelos abordan dimensiones económicas, sociales y cualitativas que influyen en la toma de decisiones de los agentes.

Uno de los componentes principales es el cálculo de la eficiencia total del sistema, que combina las eficiencias de transporte, riego y sección. Estas eficiencias se determinan en función de las características del canal, la tecnología de riego utilizada y la distancia entre la fuente de agua y las parcelas. A partir de esta eficiencia, el modelo ajusta las tasas de reparto, respetando los derechos de agua asignados a cada agente.

Otro submodelo clave es el de toma de decisiones, que integra factores técnicos y emocionales. Este permite a los agentes evaluar su percepción del sistema con base en variables económicas, estructurales y de conformidad del cultivo. La personalidad de cada agente modula esta percepción, influyendo directamente en su comportamiento frente a las normativas y en el respeto a los turnos de riego.

Finalmente, el modelo incorpora un submodelo específico para analizar la diferencia entre las tasas de reparto asignadas y la demanda hídrica de los cultivos. Este submodelo evalúa el comportamiento del agente ante dicha discrepancia y lo relaciona con factores económicos, sociales y cualitativos que determinan su reacción.

El proceso de identificación de conflictos en el sistema se desarrolla en tres etapas clave, cada una respaldada por una ecuación específica que modela las dinámicas involucradas.:

Entrega de las tasas de reparto (1): Se entregan las tasas de reparto para cada Agente F, se consideran las eficiencias de transporte, aplicación de riego y lugar que se encuentra dentro del canal para establecer una eficiencia total, luego se multiplican por el número de acciones que este posea. El cálculo de estas acciones según la bocatoma se establece como la Superficie (ha)/2.

La **Eficiencia_{Transporte}** se refiere a las pérdidas del recurso hídrico producto de condicionantes ambientales y estructurales como la evaporación, tipos de suelo, revestimientos por mencionar algunos. Para efectos de la simulación se consideran tres tipos: Entubado 100 %, Revestido: 95 % y No Revestido: 75 %.

La **Eficiencia_{Riego}** esta asociada a la tecnología que se utiliza para regar el cultivo en las parcelas y depende de la inversión del Agente F, las tecnologías pueden ser del tipo: Tendido: 30 %, Surco: 45 %, Californiano: 65 %, Aspersión: 75 %, Microjet: 85 %, Microaspersión: 85 %, Goteo: 90 % (Uribe y Ruiz, 2019).

Para simular las pérdidas por las distancias en el que el agua es conducida a hasta la Parcela donde se encuentra el cultivo, se estableció una variable llamada **Eficiencia_{Sección}** y seccionar el canal en tramos los cuales tienen un porcentaje en que el agua se va utilizando. Mientras más cercano a la fuente de agua más cantidad de agua puede utilizar: Sección 1: 90 %, Sección 2: 80 %, Sección 3: 70 % y así sucesivamente.

La ecuación que resume las eficiencias calculadas sobre las Tasas de Oferta de agua que recibe cada Agente F es la ecuación (1.1).

$$\text{Eficiencia}_{\text{Total}} = \text{Eficiencia}_{\text{Transporte}} \cdot \text{Eficiencia}_{\text{Riego}} \cdot \text{Eficiencia}_{\text{Sección}} \quad (1.1)$$

Donde:

- Eficiencia_{Transporte}: Porcentaje de eficiencia relacionado con las pérdidas de agua por factores ambientales y estructurales.
- Eficiencia_{Riego}: Porcentaje de eficiencia relacionado con la tecnología de riego utilizada por el Agente F.
- Eficiencia_{Sección}: Porcentaje de eficiencia relacionado con la distancia entre la fuente de agua y la parcela.

El reparto se basa en utilizar las Tasas que el Administrador del Canal recibe por parte de la Mesa Directiva para la semana y comparar con la información del F que está en la base de datos para calcular lo que realmente le corresponde. Es decir, se toman en cuenta los elementos de posición de la Parcela, eficiencia del transporte y eficiencia de aplicación de riego (Eficiencia_{Total}) y se le multiplica por la cantidad de acciones equivalentes a sus Derechos (DAA).

La ecuación 1.2 se detalla a continuación:

$$F_{\text{Tasas}} = \text{WB}_{\text{Tasas}} \cdot \text{Eficiencia}_{\text{Total}} \cdot F_{\text{Derechos agua}} \quad (1.2)$$

Donde

- F_{Tasas} : Tasas del F ($l \cdot s^{-1}$), calculados en base a la superficie que posee.
- WB_{Tasas} : Tasas establecidas por la mesa directiva (WB) en $l \cdot s^{-1}$.
- Eficiencia_{Total}: Es representada por la suma de eficiencias en transporte (Revestido, No Revestido y Entubado), la eficiencia de aplicación de riego (Aspersión, surco por ejemplo) (Uribe y Ruiz, 2019) y en que lugar del canal se encuentra, si dividimos en canal por secciones la sección mas alejada en el interior del canal recibe una cantidad de agua menor debido a perdidas de transporte.

Luego de realizar este cálculo, se establece cuanta agua disponible tiene el Agente F para sus actividades.

Decisión del Agente F (2): El componente más complejo de nuestro modelo es el Agente F, este componente, dotado de personalidad, integra un módulo de información crucial para la generación de conocimiento y la toma de decisiones con respecto al desarrollo del cultivo. El módulo de Información respalda el conocimiento del F Agente debido a que amplía su capacidad de comprensión del entorno y sus expectativas personales.

En este módulo de información, se consideran diversos factores, tales como Personalidad, Priorización del Cultivo, valores de eficiencia (Transporte, Riego, Posición en el Canal), Rendimiento_{Cultivo}, Costo_{Cultivo}, Valor_{Cultivo}, Huella Hídrica, Estado del Embalse, Conformidad del Cultivo, Rentabilidad, Estado de Riego y Estado de Turno. Estos datos, en su mayoría, fueron obtenidos de la matriz económica (Tabla 4), contribuyendo así al conocimiento del Agente.

Tabla 1: Aspectos Económicos que Influyen en la Selección de Cultivos

Prioridad	Cultivo	Precio de Producción \$USD	de Rendimiento $kg \cdot ha^{-1}$	Riego
Primario	Maíz	0.29	6440	surco
	Trigo	0.32	7500	tendido
	Zapallo	0.11	32000	surco
	Tomates	0.20	50400	surco
	Arándanos	1.96	11500	goteo
	Cerezas	1.26	12900	goteo
	Frambuesas	1.06	9500	surco
	Peras	0.18	49000	surco
Secundario	Alfalfa	0.10	18000	tendido
	Espárragos	0.92	5000	surco
	Kiwi	0.27	12000	surco
	Manzanas	0.16	56500	surco
Terciario	Porotos	3.77	1242	surco
	Arroz	0.59	2990	No aplicable

Fuente: Elaboración propia.

La primera tarea para contribuir a la Percepción_{Económica} está directamente relacionada con la información necesaria para que el agente F estime la cantidad de kilogramos

obtenidos de su cultivo. Este dato proporciona información económica esencial para realizar los cálculos necesarios. La ecuación utilizada para estimar la cantidad de producción se expresa en la ecuación 1.3:

$$\text{Producción}_{\text{Cultivo}} = \text{Rendimiento}_{\text{Cultivo}} \cdot \text{Superficie}_{\text{Parcela}} \quad (1.3)$$

Otro elemento lo constituyen los costos de producción por kg, reflejando la inversión necesaria en semillas, fertilizantes, riego, pesticidas y mano de obra. La ecuación proporciona una herramienta clave para evaluar y gestionar eficientemente los recursos financieros asociados al cultivo, permitiendo al agente F tomar decisiones informadas (ODEPA, 2023). La ecuación de cálculo de costos de producción 1.4 se detalla a continuación:

$$\text{Costo}_{\text{Potencial}} = \text{Producción}_{\text{Cultivo}} \cdot \text{Costo}_{\text{kgcultivo}} \quad (1.4)$$

Las expectativas de ganancias agrícolas para la temporada se basan en una evaluación de factores económicos y climáticos que afectan el rendimiento de los cultivos. Los ingresos potenciales se estiman mediante la ecuación 1.5. Esta expectativa de ingreso, ayudan a determinar el proceder del agente F.

$$\text{Ganancia}_{\text{Potencial}} = \text{Producción} \cdot \text{Valor}_{\text{Cultivo}} \quad (1.5)$$

La lógica de decisión se complementa con los ingresos netos, detallados en la ecuación 1.6. Estos ingresos netos, derivados de restar los costos de producción a las ganancias potenciales, proporcionan una medida clara de la rentabilidad real obtenida por el F, aportando así el ciclo de evaluación financiera en el contexto de la producción agrícola.

$$\text{Ganancia}_{\text{Neta}} = \text{Ganancia}_{\text{Potencial}} - \text{Costos}_{\text{Producción}} \quad (1.6)$$

La evaluación financiera en el contexto de la producción agrícola se completa con la consideración del Retorno sobre la Inversión (ROI). La ecuación que representa el ROI se detalla en la ecuación 1.7, donde se relaciona la ganancia neta con los costos de

producción:

$$ROI = \left(\frac{\text{Ganancia}_{\text{Neta}}}{\text{Costos}_{\text{Producción}}} \right) \times 100 \begin{cases} \text{Rentable,} & \text{si } ROI > 0 \\ \text{No-Rentable,} & \text{si } ROI < 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

Este ROI, es útil para el agente F para medir la eficacia de la inversión realizada. Un ROI positivo indica que la producción agrícola generó ganancias superiores a los costos incurridos, reflejando una inversión rentable. La interpretación del ROI se convierte en un componente esencial para la toma de decisiones informadas, permitiendo al F evaluar la eficiencia de su inversión y ajustar estrategias según el rendimiento financiero real.

La toma de decisiones es un proceso complejo que requiere tanto de emociones como de información Bechara, H. Damasio y A. R. Damasio (2000) y Lerner et al. (2015). En nuestra simulación, contamos con la información necesaria para activar el sistema, pero también abordamos la dimensión emocional del agente, sintetizando factores individuales de los agentes F, tales como emociones y conocimientos. Este desafío se abordó utilizando referencias de autores como Mehrabian (1996), Ortony (2003), y John, Naumann y Soto (2008), quienes investigaron la medición de estados anímicos, estructuras emocionales humanas y modelos de personalidad, respectivamente. Esta información se sintetizó en el uso del indicador compuesto denominado $F_{\text{Percepcion}}$, que refleja la evaluación del F en componentes fundamentales: estructura, económico, conformidad del cultivo (por agua recibida) y la aceptación a las normas. Cada componente contribuye de manera ponderada a la percepción total, reflejando su importancia relativa para el agente. Además, la personalidad del agente desempeña un papel crucial, ya que sus valores actúan como multiplicadores que amplifican la percepción total, como se representa en la ecuación 1.8.

$$F_{\text{Percepcion}} = \alpha \cdot I_{\text{Percepcion}} + \beta \cdot E_{\text{Percepcion}} + \gamma \cdot C_{\text{Percepcion}} \pm \epsilon \cdot R_{\text{Percepcion}} \quad (1.8)$$

Donde:

- $\alpha, \beta, \gamma,$ y ϵ son los pesos asignados a cada una de las dimensiones consideradas en la función multidimensional $F_{\text{Percepcion}}$.
- $I_{\text{Percepcion}}$: Es la percepción del agente F respecto de la disponibilidad de agua para riego.
- $E_{\text{Percepcion}}$: Es la percepción del agente F respecto a los costos de producción y valor en el mercado del producto y rentabilidad de la inversión.
- $C_{\text{Percepcion}}$: Es la percepción de F respecto de condición del estado hídrico de sus cultivos.
- $R_{\text{Percepcion}}$: Es la percepción del agente F respecto las normativas bajo las cuales se debe regir el uso del agua. Investigaciones recientes (Charakorn, Manoonpong y Dilokthanakul, 2023; Hongxin Zhang et al., 2023) destacan la variabilidad en la percepción de estas reglas, subrayando la importancia de las sanciones para mantener la cooperación entre agentes, con impactos positivos, negativos o neutros dependiendo del contexto. Debido a lo anterior, en nuestro SHABM, esta dimensión depende de la personalidad del agente F. Para ello se ha utilizado una clasificación de conducta prosocial, que los clasifica en: colaboradores, egoístas y neutrales) (Ortiz-Riomalo, Koessler y Engel, 2021; Choquette-Levy et al., 2024; Baumsteiger y Siegel, 2019). Así, para los agentes F egoístas, las reglas se suelen percibir negativamente al ser vistas como restricciones a sus intereses personales; en contraste, los agentes F colaboradores tienden a valorar las reglas positivamente, considerando que estas promueven la cooperación y el bienestar colectivo. Los agentes F neutrales, por su parte, tienden a mostrar una reacción equilibrada o indiferente hacia las reglas, lo que significa que su percepción de $R_{\text{Percepcion}}$ puede ser neutral o tener un impacto mínimo en su evaluación global (Becker, 1968; Tyler, 1990).

El cálculo de *umbral de Ignorar Turno* determina cuándo un agente decide desobedecer su turno de riego, combinando la probabilidad de ignorar las reglas con el nivel de fiscalización. A medida que aumenta la supervisión, el umbral disminuye, incentivando el respeto a las normativas. Por el contrario, con baja fiscalización, el umbral

sube, facilitando que el agente ignore su turno. Este ajuste dinámico refleja cómo la interacción entre factores externos (fiscalización) e internos (personalidad) influye en el comportamiento de los agentes en el sistema (Ecuaciones 1.9 y 1.10).

Donde $Probabilidad_{Ignorar\ Turno}$ es la probabilidad del agente F de ignorar el turno de riego, y $Supervision\ \%$ es el porcentaje de fiscalización en rango desde desde 0 hasta 100 % como máximo, y O^c es el complemento normalizado de $Supervision\ \%$.

$$Umbral_{Ignorar\ Turno} = Probabilidad_{Ignorar\ Turno} \cdot O^c \quad (1.9)$$

Donde:

- $Probabilidad_{Ignorar\ Turno}$: Variable asociada a la probabilidad del agente F, para ignorar el turno de riego en rangos de colaboradores (10-30 %), neutrales (40-60 %) y egoistas (80-100 %). La probabilidad utilizada es la aleatoria uniforme (*random uniform*) (Li y Zhao, 2023; S. Kim y Lee, 2021), con la utilización complementaria de semilla (*random.seed()*) para garantizar la replicabilidad de las simulaciones. (J. Smith y Clark, 2022; L. Brown y Martin, 2021).
- $Supervisión\ \%$: Porcentaje de fiscalización en rango desde desde 0 hasta 100 % como máximo.

El factor de supervisión O^c , descrito en la Ec. 1.9, representa el nivel de vigilancia ejercido sobre el cumplimiento de las reglas por parte de los agentes. Este factor varía en función de la severidad de las fiscalizaciones para condicionar las decisiones tomadas por los agentes bajo distintos escenarios.

$$O^c = \frac{100 - Supervision\ \%}{100} \quad (1.10)$$

Luego de obtenidos los valores de $F_{Percepcion}$ y $Umbral_{Ignorar\ Turno}$, se someten al cálculo de decisión de **Respetar o Ignorar** el Turno de riego:

$$\text{Decision} = \begin{cases} \text{Respetar Turno,} & F_{\text{Percepcion}} > \text{Umbral}_{\text{Ignorar Turno}} \\ \text{Ignorar Turno,} & F_{\text{Percepcion}} \leq \text{Umbral}_{\text{Ignorar Turno}} \end{cases} \quad (1.11)$$

Dinámica de decisión y respuesta (3)

La lógica del modelo también contempla cómo los agentes toman decisiones basadas en su percepción del sistema y el nivel de supervisión. Cuando un agente enfrenta decisiones sobre respetar o ignorar su turno de riego, esta elección depende de la relación entre su percepción total y el umbral ajustado según la fiscalización. Un mayor nivel de supervisión reduce este umbral, incentivando el cumplimiento de las normas, mientras que una menor supervisión lo eleva, facilitando el incumplimiento de Turno.

Por último, el modelo evalúa la respuesta de los cultivos ante la disponibilidad de agua. Este componente, estrechamente vinculado con las decisiones de los agentes, determina si las necesidades hídricas de los cultivos están siendo satisfechas. Esta evaluación se envía al módulo del agente para que integre las reacciones del sistema en sus decisiones futuras, cerrando así el ciclo de retroalimentación del modelo 1.12.

$$\text{Diferencia} = \frac{(F_{\text{Tasa}} - \text{Demanda}_{\text{Cultivo}})}{(F_{\text{Tasa}} + \text{Demanda}_{\text{Cultivo}})} \begin{cases} \text{Conforme,} & \text{si} > 0 \\ \text{No Conforme,} & \text{si} < 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

Donde

- F_{Tasa} : Tasas equivalentes a los DAA del Agente F ($l \cdot s^{-1}$).
- $\text{Demanda}_{\text{Cultivo}}$: Demanda del Cultivo desde $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$, transformados a $l \cdot s^{-1}$.

Esta reacción por parte del cultivo se envía al módulo de Agente F junto con otros campos necesarios: Parcela, Coordenadas, Cultivo, Semana, Día, Diferencia, Estado Embalse (*Río Libre o Riego Regulado*), Estado Riego (Habilitado, No Habilitado), Estado Turno (Conforme, No Conforme, Sin Turno).

Esta integración de elementos técnicos y sociales permite que el modelo represente de manera precisa y transparente las dinámicas de gestión hídrica en sistemas agrícolas. La descripción detallada de las ecuaciones y procedimientos asegura que la estructura del modelo sea reproducible y verificable, cumpliendo con los estándares metodológicos propuestos en el protocolo ODD.

Capítulo 2

Desarrollo e Implementación de la Herramienta para la Simulación del Modelo SHABM

2.1. Introducción

Los sistemas de gestión hídrica en cuencas agrícolas enfrentan desafíos crecientes debido a la variabilidad climática y la competencia por recursos limitados. La comprensión de las interacciones entre factores sociales y procesos hidrológicos resulta fundamental para anticipar y gestionar conflictos potenciales en la distribución del agua. Este capítulo describe la implementación de la herramienta tecnológica para simular interacciones socio-hidrológicas a escala de cuenca.

En esta herramienta se utiliza un enfoque de programación orientada a objetos (POO) utilizando *Python* como lenguaje de desarrollo y *MongoDB* como sistema de gestión de base de datos no relacional. Esta combinación permite organizar la información para modelar las dinámicas de los agentes, facilitando el análisis y la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos mediante modelos basados en agentes (ABM).

La arquitectura de datos, implementada en MongoDB (AgroDB) (Inc., 2024), se estructura en cuatro colecciones fundamentales que capturan la multidimensionalidad del sistema: caracterización de agentes y patrones de riego, series temporales de demanda hídrica, parámetros técnico-económicos de cultivos, y tasas de distribución semanal de agua para riego. La metodología integra datos geoespaciales mediante archivos shapefile que vinculan identificadores de parcelas, roles de propietarios y demandas hídricas, complementados con registros fluviométricos del río Longaví para el cálculo de tasas de distribución. El modelo incorpora la cuantificación de aportes subterráneos y regulación por embalse, proporcionando una representación comprehensiva del sistema hidrológico.

La estructura de datos diseñada para este trabajo permite simular escenarios con diferentes niveles de disponibilidad hídrica y supervisión institucional, facilitando el análisis de las dinámicas adaptativas entre los usuarios y los recursos hídricos durante períodos de riego regulado. Esta aproximación metodológica establece las bases para un análisis sistemático de las interacciones socio-hidrológicas, considerando la influencia de factores sociales, técnicos y ambientales en las decisiones individuales y colectivas.

El proceso metodológico seguido se ilustra en la Figura 4, que resume los pasos principales del modelo SHABM. Este esquema muestra cómo los datos recolectados de las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUA), junto con variables técnicas (como la disponibilidad hídrica y las tasas de distribución) y sociales (como la personalidad de los agentes y su percepción de las reglas), se integran en un marco conceptual para diseñar escenarios. Posteriormente, estos escenarios son simulados, generando resultados que permiten identificar patrones emergentes, evaluar el cumplimiento de turnos y analizar conflictos potenciales. La implementación de este flujo de trabajo proporciona un modelo replicable que puede adaptarse a otros contextos agrícolas afectados por la escasez hídrica.

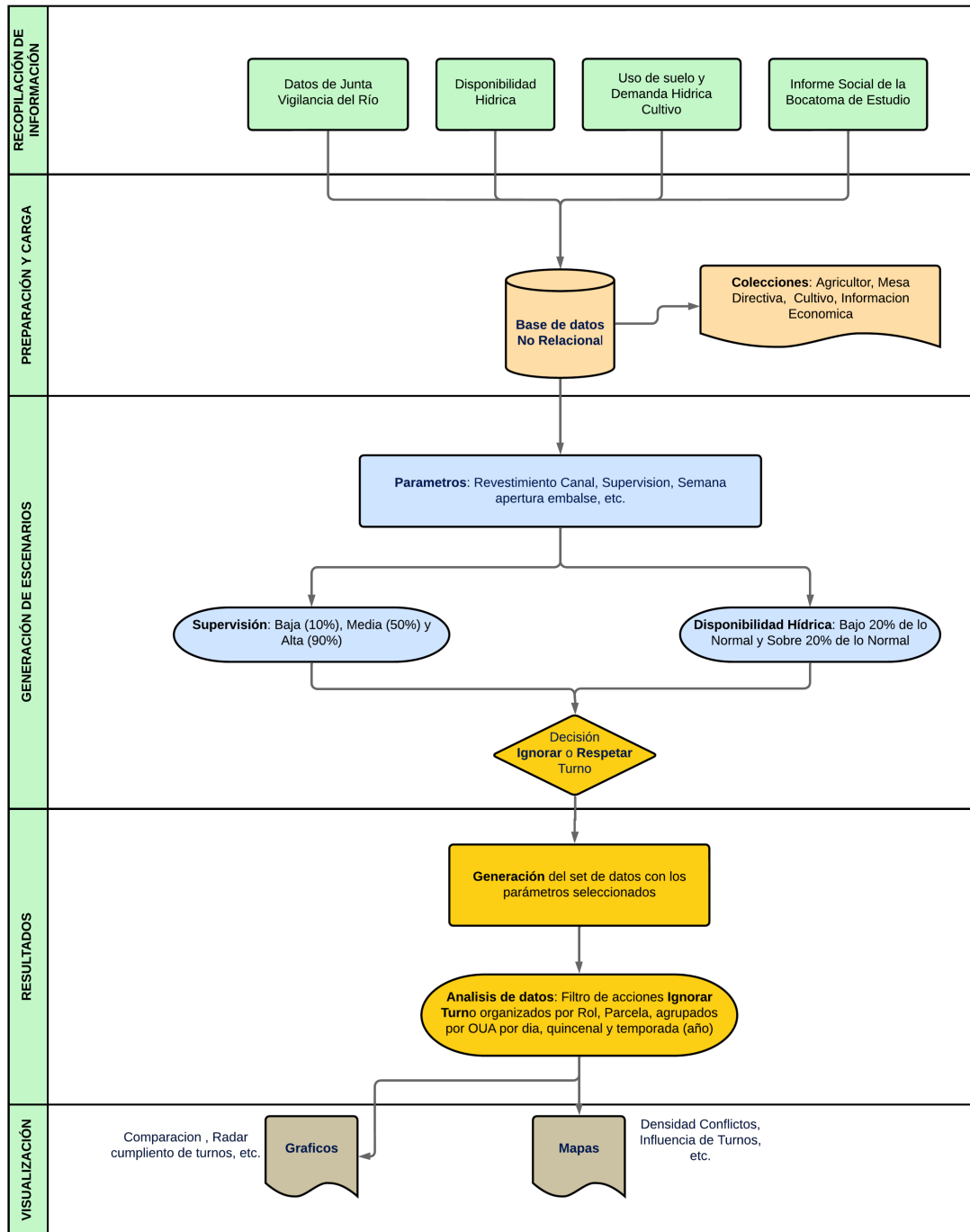


Figura 4: Esquema del flujo metodológico para el modelo SHABM

Fuente: Elaboración propia.

La contribución principal de este trabajo reside en proporcionar una base de datos estandarizada y documentada que permite replicar experimentos desde la socio-hidrología utilizando ABM. El conjunto de datos incluye variables críticas como patrones de riego,

demandas hídricas, parámetros técnico-económicos de cultivos y tasas de distribución de agua, estableciendo un marco robusto para el análisis de conflictos potenciales en sistemas de gestión hídrica a escala de cuenca.

2.2. Escenarios de Simulación

Los escenarios de simulación se fundamentan en condiciones observadas en campo y están diseñados para examinar cómo las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica influyen en el comportamiento de los agricultores y en la emergencia de tensiones sociales. El modelo implementa tres escenarios de disponibilidad de agua: un escenario base que refleja condiciones normales, y dos escenarios que representan variaciones de $\pm 20\%$ respecto al caudal base. Esta configuración permite evaluar sistemáticamente las respuestas del sistema bajo condiciones de escasez y abundancia relativa del recurso hídrico.

Complementariamente, el modelo incorpora una dimensión institucional al evaluar múltiples niveles de supervisión en el cumplimiento de las asignaciones volumétricas por usuario. El espectro de supervisión abarca desde una fiscalización mínima hasta un monitoreo intensivo, permitiendo analizar cómo los diferentes grados de control institucional modifican las dinámicas del sistema. Los resultados evidencian que escenarios caracterizados por baja disponibilidad hídrica combinados con supervisión deficiente generan condiciones propicias para la emergencia de conflictos. En contraste, la implementación de mecanismos de fiscalización robustos, junto con una oferta hídrica estable, contribuye significativamente a la reducción de tensiones y promueve una mayor adherencia a los turnos de riego establecidos.

El conjunto de datos presentado, si bien proporciona una base para el análisis de sistemas sociohidrológicos, presenta limitaciones importantes que deben considerarse en su aplicación. En términos de la caracterización de los agentes, el modelo se fundamenta principalmente en variables económicas y técnicas, como la rentabilidad

del cultivo y la conformidad con la oferta hídrica recibida. Esta simplificación, aunque necesaria para simular el modelo, excluye factores sociales relevantes como las redes de cooperación entre agricultores, la transmisión de conocimiento local, y las preferencias individuales que podrían influir en las decisiones de riego.

La temporalidad del conjunto de datos está limitada a una temporada de riego, lo que restringe la capacidad de analizar efectos acumulativos o cambios en los patrones de comportamiento a largo plazo. Además, la resolución temporal semanal de las tasas de distribución puede no capturar variaciones significativas en escalas temporales más finas.

La estructura de datos, aunque útil para el análisis de conflictos por distribución de agua, no incorpora variables ambientales complementarias como la variabilidad climática local o la degradación de suelos, que podrían influir en las decisiones de los agricultores y en la eficiencia del uso del agua. Futuras versiones del conjunto de datos podrían beneficiarse de la inclusión de estos elementos para proporcionar una representación más comprehensiva del sistema sociohidrológico.

2.3. Metodología y Estructura de Datos

El conjunto de datos está diseñado para analizar las interacciones sociohidrológicas durante la **Temporada de Riego**, período que abarca aproximadamente 29 semanas por año. Esta temporada representa el intervalo crítico donde se estudian las interacciones sociales y decisiones relacionadas con el uso del agua, cuya duración puede variar según condiciones climáticas que determinan la apertura y cierre del embalse, afectando directamente las tasas de distribución gestionadas por la Junta de Vigilancia del Río.

La estructura temporal del conjunto de datos se organiza mediante los **Turnos de Riego**, que constituyen derechos temporales de uso del agua asignados según un cronograma establecido. Estos turnos operan en ciclos de 14 días, donde cada agricultor tiene

asignado uno o dos días de riego dependiendo de sus derechos de agua disponibles, estableciendo así el marco temporal básico para la gestión y distribución del recurso hídrico.

Los aspectos sociales del modelo se estructuran en torno a las interacciones entre agentes y su comportamiento frente al recurso hídrico. El sistema considera parcelas como agentes activos, cada una con un código único de identificación. La dimensión social se caracteriza por:

Interacciones: Los agentes, aunque estáticos espacialmente por representar cultivos, mantienen interacciones dinámicas basadas en sus decisiones de riego y uso del agua; **Comportamiento Adaptativo:** Las respuestas de los agentes se clasifican como *Conforme* o *No Conforme* según la satisfacción de su demanda hídrica; **Factores de Decisión:** Las decisiones incorporan variables económicas (rentabilidad del cultivo), técnicas (estado de la infraestructura) y disponibilidad de recursos; **Temporalidad:** El análisis de interacciones sociales abarca el período completo de la temporada agrícola, permitiendo observar patrones de comportamiento y emergencia de conflictos.

La arquitectura de datos se implementa en MongoDB (AgroDB) a través de cuatro colecciones fundamentales:

- **Tabla_{Agricultor}:** Caracteriza los agentes agrícolas mediante datos sobre cultivos, superficie y patrones de riego
- **Demanda_{Cultivo}:** Registra la ubicación espacial y demanda hídrica diaria de cada parcela
- **Tabla_{Cultivo}:** Clasifica los cultivos (cereales, forrajeras, frutales menores y hortalizas) e incluye variables técnico-económicas
- **Tabla_{Oferta}:** Contiene las tasas de distribución semanales calculadas para la temporada

La infraestructura hídrica se modela considerando capacidad de almacenamiento, eficiencia de transporte y tecnologías de distribución (Uribe y Ruiz, 2019), permitiendo

simular pérdidas y condiciones realistas de gestión del sistema. Esta estructura integrada permite analizar sistemáticamente los conflictos potenciales derivados de las diferencias entre oferta y demanda hídrica en el sistema, considerando tanto aspectos técnicos como sociales.

2.4. Estructura Conceptual

Una estructura conceptual y tecnológica facilita el desarrollo de aplicaciones al proporcionar herramientas, reglas y patrones que estandarizan y simplifican su implementación (Gamma et al., 1994). En el caso de la herramienta diseñada para el modelo SHABM, el esquema integra las diferentes capas del modelo, desde la recopilación y procesamiento de datos hasta la simulación y el análisis de resultados. Este enfoque asegura modularidad, escalabilidad y un mantenimiento eficiente, además de permitir la interoperabilidad entre los componentes del sistema. El esquema desarrollado incluye:

2.4.1. Lenguaje de programación y base datos

El lenguaje de programación *Python* fue seleccionado por su versatilidad, amplia biblioteca de herramientas, y su capacidad de integrar diversos paradigmas de programación, incluido el enfoque orientado a objetos (Lutz, 2013). Este lenguaje proporciona una sintaxis clara y concisa, lo que lo convierte en una opción ideal para modelar dinámicas complejas en sistemas socio-hidrológicos. Además, su capacidad de interoperar con otras tecnologías y su facilidad para manejar grandes volúmenes de datos lo hacen particularmente valioso en el contexto de simulaciones y análisis intensivos (Oliphant, 2007).

MongoDB, por otro lado, se eligió por su naturaleza no relacional y su modelo de datos basado en documentos, que proporciona flexibilidad en la representación y manipulación de datos (Chodorow, 2013). Este sistema de base de datos es especialmente adecuado para gestionar información estructurada y semi-estructurada de manera eficiente, permitiendo la escalabilidad horizontal y la alta disponibilidad necesarias para

aplicaciones distribuidas y dinámicas (Banker, 2011).

La combinación de *Python* y *MongoDB* resulta óptima para aplicaciones como esta, donde la interacción entre datos complejos y estructuras dinámicas requiere una solución robusta, escalable y de fácil mantenimiento. El uso de Python como núcleo del desarrollo, junto con MongoDB como repositorio de datos, garantiza una integración fluida y eficiente, permitiendo abordar los desafíos inherentes a la modelación de sistemas socio-hidrológicos complejos. Para una mejor comprensión del desarrollo, este capítulo detalla el proceso de implementación en Python y MongoDB.

2.4.2. Simulación Basada en Agentes

La implementación de la herramienta SHABM emplea una simulación basada en agentes (ABM) para representar las decisiones y las interacciones entre los usuarios del agua dentro de la cuenca. En este modelo, cada agente está configurado para simular una parcela agrícola específica, dotada con atributos determinados como el tipo y superficie del cultivo, necesidades hídricas y la eficiencia en el uso del agua. Los agentes están programados para responder a factores socioeconómicos que afectan la gestión del agua, tales como la rentabilidad esperada del cultivo y los cambios económicos externos, incluyendo fluctuaciones en el valor del dólar, que influyen en sus estrategias de riego (Lynch y Moorcroft, 2021).

Las decisiones sobre el riego se basan en algoritmos que consideran la disponibilidad de agua y las necesidades específicas del cultivo, integrando tanto las condiciones actuales del entorno, como el estado de los embalses, como las dinámicas económicas implicadas. Por ejemplo, si un agente toma más agua de la permitida, esto puede reducir la disponibilidad para otros usuarios aguas abajo, provocando potenciales conflictos o la necesidad de renegociar los derechos del agua (Parker, Hessel y Davis, 2005).

El modelo también permite simular diferentes escenarios de disponibilidad hídrica y supervisión, posibilitando a los gestores evaluar diversas estrategias de gestión del

agua. Estos escenarios son esenciales para identificar ajustes que podrían mejorar la distribución del agua, apoyando una toma de decisiones fundamentadas para la gestión de los recursos hídricos (Matthews y Gilbert, 2005; Schlüter y Pahl-Wostl, 2006).

Este enfoque destaca la variabilidad e incertidumbre de las interacciones entre los usuarios del agua y los recursos disponibles, y ofrece un mecanismo para analizar cómo las decisiones pueden influir en el sistema hídrico a nivel de cuenca. Al incorporar el impacto de las decisiones individuales dentro del modelo, SHABM facilita la creación de estrategias de gestión adaptativas que responden a condiciones cambiantes (Bona-beau, 2002).

2.4.3. Recolección de Datos Sociales

La caracterización de los agentes en esta investigación se basó en encuestas aplicadas a miembros de las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUAs), evaluando percepciones normativas, infraestructura y criterios de selección de cultivo. Los datos técnicos fueron complementados con registros hidrológicos y climáticos obtenidos de estaciones de monitoreo e integrados al modelo.

Sin embargo, las dinámicas sociales complejas, como la evolución de la cooperación, no se encuentran modeladas en esta investigación. Si bien las reglas propuestas por (Nowak, 2006) para la evolución de la cooperación: reciprocidad directa, reciprocidad indirecta, cooperación en redes, selección grupal y selección por parentesco, ofrecen un marco conceptual robusto para entender cómo pueden estructurarse las interacciones sociales en sistemas complejos, su implementación exige datos adicionales y una representación más detallada de las interacciones a largo plazo. En este sentido, las respuestas de los agentes frente a interacciones complejas no han sido incluidas, exceptuando las reacciones específicas de ignorar o respetar turnos bajo la supervisión realizada.

2.4.4. Validación del Modelo

La validación del modelo se fundamentó en un enfoque cualitativo, utilizando métricas indirectas como el cumplimiento de turnos y el análisis de sensibilidad para evaluar las dinámicas del sistema. Este enfoque permitió abordar la ausencia de registros directos sobre conflictos en el área de estudio, integrando percepciones sociales documentadas en el informe social, como desigualdades en la distribución del agua y tensiones asociadas a la variabilidad hídrica. Estas percepciones fueron incorporadas al modelo mediante el protocolo ODD (*Overview, Design concepts, and Details*, en español: Descripción General, Conceptos de Diseño y Detalles) (Grimm, Steven F Railsback et al., 2020), una metodología ampliamente utilizada para estructurar y validar modelos basados en agentes en contextos socio-ecológicos (Steven F. Railsback y Grimm, 2019; An, Daniel G. Brown et al., 2021).

El cumplimiento de turnos se definió como un indicador indirecto para inferir tensiones entre los agentes, especialmente en escenarios caracterizados por baja disponibilidad hídrica. Este enfoque metodológico destaca la utilidad de métricas indirectas para capturar dinámicas complejas que no son observables de manera directa (Martínez Rizo, 2010; Epstein, 2006). El uso de indicadores indirectos ha sido reconocido como una práctica adecuada en estudios donde la recolección de datos empíricos es limitada (Gilbert, 2005; Edmonds y Meyer, 2019).

Además, se implementó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo variaciones en parámetros clave del modelo, tales como los niveles de supervisión (10 %, 50 %, 90 %), la disponibilidad hídrica (reducción del 20 %, normal y aumento del 20 %) y las proporciones iniciales de personalidades de los agentes (egoístas, neutrales y colaboradores), afectan las dinámicas simuladas. Este tipo de análisis es esencial para identificar la robustez de los modelos y comprender el impacto de las configuraciones iniciales en los patrones emergentes (Saltelli et al., 2004; Ligmann-Zielinska, Sun y Kramer, 2012; Grimm, Polhill y Touza, 2017). Al incorporar variaciones en estos parámetros, se garantizó que el modelo fuera capaz de capturar dinámicas relevantes en sistemas

socio-hidrológicos y reflejara de manera adecuada las interacciones entre agentes bajo distintos escenarios.

2.5. Requerimientos Conceptuales y de Información

Para implementar la herramienta SHABM se requieren datos que representen tres dimensiones clave: área de estudio, infraestructura hídrica y aspectos sociales. Los cuales se encuentran esquematizados en la Figura 5.

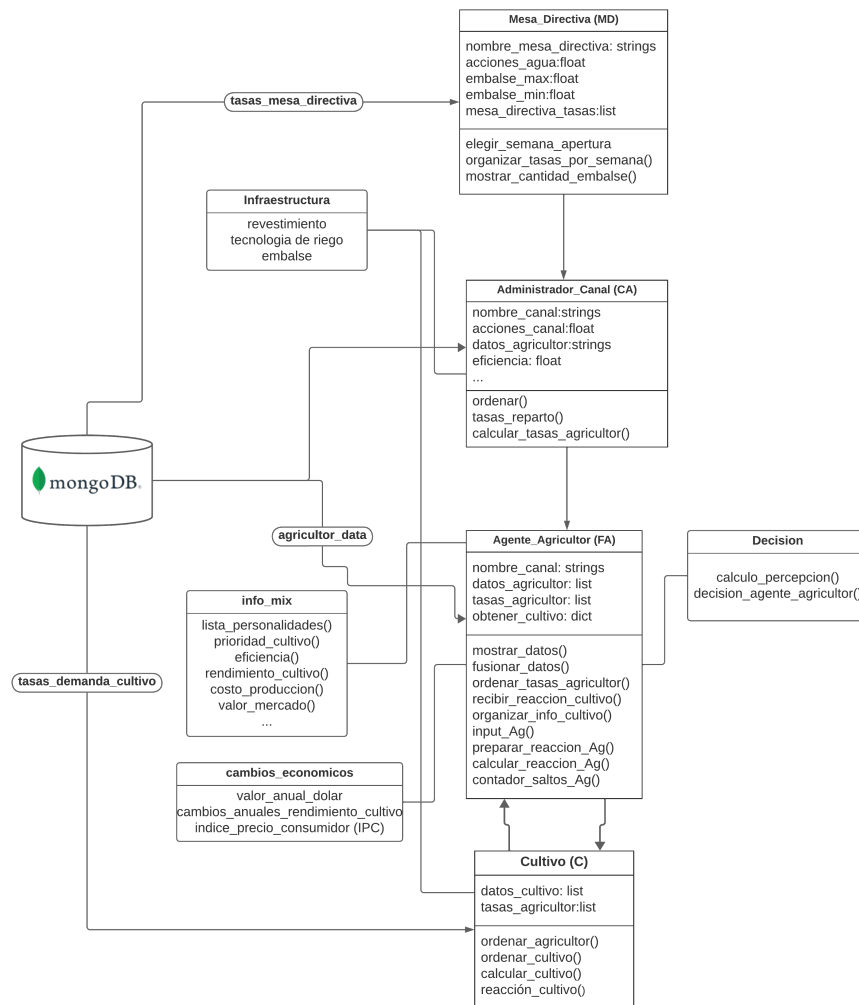


Figura 5: Esquema de la herramienta y la base de datos MongoDB.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.1. Elementos Iniciales

La implementación representa una estructura de riego local, gestionada por la Junta de Vigilancia, que incluye una red de canales con alta fragmentación parcelaria. La información geográfica de esta red se almacena en un archivo shapefile (Tabla. 2) que utiliza el sistema de coordenadas EPSG:4326 - WGS 84. Este archivo contiene identificadores de parcelas, información de propietarios (*Rol*) y las demandas hídras diarias, expresadas en $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$.

Tabla 2: Atributos del Shapefile

Atributos	Tipo	Descripción
IdParcela	String	Identificador de Parcela del Agricultor.
Rol	String	.
Bocatoma	String	Nombre de la Bocatoma.
ETe	Float	Demanda hídrica por cultivo en $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$.

Fuente: Elaboración propia.

Infraestructura: Los datos consideran las pérdidas en eficiencias en distribución y tecnologías de aplicación de riego, así como la ubicación de cada agente dentro de las organizaciones de usuarios de agua (OUA); **Interacción:** Los agentes permanecen estáticos en el espacio de simulación al ser representaciones de parcelas.; **Temporalidad:** Se utilizan datos de demanda hídrica diaria entre dos fechas de interés, donde ocurren reacciones durante la temporada agrícola (Ignorar o Respetar Turno de Riego); **Número de Agentes:** Se seleccionaron 22 parcelas para actuar como agentes, cada una identificada con un código único. Asignando personalidades del tipo egoístas, neutrales y colaborativos de forma aleatoria; **Interacciones:** Efectos acumulativos de decisiones individuales.; **Reacciones:** Las respuestas de los agentes dependen de si la oferta de agua satisface sus demandas, siendo *Conforme* si hay suficiente agua y *No Conforme* si hay déficit y otros factores como el estado de infraestructura y factores económicos como la rentabilidad del cultivo.

2.6. Requerimientos Técnicos

Los datos se importan desde archivos *CSV* y *JSON* a la base de datos *MongoDB*. Durante esta etapa, se verifica la integridad y consistencia de los datos para asegurar su calidad. Luego Los datos se clasifican en varias colecciones dentro de la base de datos *MongoDb*. Las colecciones incluyen:

1. **Tabla_{Agricultor}**: Contiene información sobre el tipo de cultivo y superficie, acciones de riego y datos relacionados con el agricultor.
2. **Demanda_{Cultivo}**: Incluye detalles sobre la ubicación de la parcela, el tipo de cultivo y su demanda hídrica diaria.
3. **Tabla_{Cultivo}**: Clasifica los cultivos en grupos (cereales, forrajeras, frutales menores y hortalizas) y proporciona datos técnicos como el valor de producción y el valor de mercado.
4. **Tabla_{Oferta}**: Contiene la oferta hídrica con las tasas de distribución semanales para la temporada agrícola.

2.6.1. Ecuaciones para el Cálculo de Tasas de Distribución

Los datos de la oferta hídrica son obtenidos de los flujos semanales promedio del agua del son necesarios para el cálculo de tasas de distribución para la temporada por parte de la mesa directiva. La ecuación (2.1) permite convertir el flujo del río ($m^3 \cdot s^{-1}$) a un volumen natural para ser utilizado en m^3 .

$$\mathbf{Volumen}_{\text{Natural}} (m^3) = \text{dias de la semana} \cdot \text{Flujo}_{\text{Disponible}} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{3600s}{h} \cdot \frac{24h}{\text{día}} \quad (2.1)$$

La Disponibilidad Total de agua representada por la ecuación (2.2) está dada por la suma del volumen natural del río (m^3) y la disponibilidad de agua subterránea (m^3).

$$\mathbf{Disponibilidad}_{\text{Total}} (m^3) = \mathbf{Volumen}_{\text{Natural}} (m^3) + \mathbf{Disponibilidad}_{\text{Subterránea}} (m^3) \quad (2.2)$$

La Superficie Total Disponible (m^3) y los aportes del embalse (m^3) son los necesarios para poder establecer las tasas de distribución para todos canales de la junta de vigilancia. Por otra parte, es necesario señalar que los aportes del embalse están dados por la fecha de apertura del mismo. En la ecuación (2.3) representa este proceso.

$$\mathbf{Superficie}_{\text{Total}} (m^3) = \mathbf{Disponibilidad}_{\text{Total}} (m^3) + \mathbf{Contribución}_{\text{Embalse}} (m^3) \quad (2.3)$$

El cálculo de las tasas de distribución se realizó utilizando los reportes fluvio-métricos de caudales medios diarios del río Longaví, obtenidos de la Estación de la Dirección General de Aguas (DGA) en la Quiriquina, ubicada en la Cuenca del Río Maule, Subcuenca Río Loncomilla, a 449 msnm (Latitud S: 36° 13' 46", Longitud W: 71° 27' 26"). Estos datos se promediaron semanalmente para el período 2017-2022 y se procesaron según la ecuación (2.4), considerando los 20,920 derechos de agua consuntivos asignados a la Junta de Vigilancia del Río.

$$\mathbf{Tasas}_{\text{Distribución}} \left(\frac{l}{s} \right) = \left(\frac{\mathbf{Superficie}_{\text{Total}} (m^3)}{\mathbf{Días de la Semana} \cdot \frac{24h}{\text{día}} \cdot \frac{3600s}{h}} \right) \cdot \left(\frac{1000l}{m^3 \cdot 20920} \right) \quad (2.4)$$

2.7. Implementación

La herramienta desarrollada en *Python* combina un diseño modular con capacidades de visualización utilizando la librería *Streamlit* para integrar datos simulados de manera eficiente los datos iniciales que se integran en la base de datos *MongoDB* llamada **AgroDB**, que contiene cuatro colecciones para la simulación: **Tabla**_{Agricultor}, que almacena los detalles de los agentes agrícolas (parcelas); **Demanda**_{Cultivo}, que incluye las demandas hídricas específicas de los cultivos; **Tabla**_{Cultivo}, que ofrece información técnica y la clasificación de cultivos; y **Tabla**_{Oferta}, donde se almacenan las tasas de distribución de agua.

La información recopilada se organiza y normaliza para garantizar consistencia y

coherencia en el procesamiento, facilitando la identificación y el análisis de conflictos en la distribución de agua dentro de la cuenca del río Longaví. La simulación comienza con la configuración de parámetros iniciales, como:

Estado de la capacidad del embalse (mínimo y máximo), Semana de apertura del embalse, Tipos de recubrimiento del canal (No Revestido, Revestido o Entubado) y Porcentajes de supervisión en %, en el rango de 10 % al 90 % (Uribe y Ruiz, 2019)

Durante la simulación, los módulos **Info**_{Mix} y **Economic**_{Changes} complementan los datos proporcionando información clave sobre personalidades, rendimientos, costos de producción, valor de mercado y prioridades de cultivo. Además, incorporan variaciones anuales del dólar, cambios en el Índice de Precios al Consumidor (IPC) y fluctuaciones en el rendimiento de los cultivos. Esta información resulta fundamental para apoyar la toma de decisiones de los agentes agrícolas y enriquecer el análisis durante la ejecución del programa.

Para manejar simulaciones de distintos niveles de supervisión(%), se emplea multiprocesamiento, permitiendo la ejecución simultánea de simulaciones en paralelo. Los resultados se gestionan mediante una cola de mensajes (*Queue*), optimizando la eficiencia del código y permitiendo análisis comparativos entre diferentes escenarios.

La estructura modular de la Figura 6 muestra la forma en la que la información se mueve desde la etapa de recolección y orden (1), luego la carga en la base de datos *MongoDB* (2) y la utilización de las clases específicas como *WB*, (que representa las Organizaciones de Usuarios del Agua - OUA), *CanalAdm* (para la administración de los canales), *Farmer* (que modela los agentes o parcelas) y *Crop* (que gestiona los atributos de los cultivos) (3). Estas clases interactúan para procesar los datos a través de funciones como **process**_{data}, que organiza la simulación, e **influencia**_{entorno}, que determinan las consecuencias de decisiones de riego (4).

Finalmente, los resultados de la simulación se etiquetan espacio-temporalmente

- **influencia**_{recalculada}: Presenta la influencia recalculada sin considerar iteraciones.
- **influencia**_{combinada}: Concatena los resultados de las decisiones iterativas y simples para ofrecer un análisis integral.

Estos datos se visualizan mediante gráficos y mapas georreferenciados, que muestran la distribución de los eventos de ignorar turno, la conformidad de los cultivos con las demandas hídricas y los posibles conflictos derivados del uso del recurso. La herramienta desarrollada en *Streamlit* permite configurar los parámetros de manera interactiva, pero también ofrece la flexibilidad de ejecutarse en modo código para análisis automáticos o por lotes, adaptándose a diferentes necesidades de estudio.

En el procesamiento, la función **influencia**_{entorno} juega un papel clave al evaluar cómo las decisiones individuales de los agentes impactan el sistema en su conjunto. Esto incluye el análisis de interacciones entre agentes y la cuantificación de pérdidas de agua en metros cúbicos (m^3) asociadas a turnos de riego ignorados. Los resultados se organizan en una escala diaria, con la posibilidad de ajustar el análisis a intervalos estacionales o multianuales, permitiendo una comprensión detallada y flexible de las dinámicas del sistema.

La herramienta ofrece un marco robusto y modular para modelar interacciones socio-hidrológicas en entornos agrícolas. Su diseño asegura escalabilidad, precisión y facilidad de uso, consolidándose como un recurso valioso para la planificación y gestión hídrica. Al combinar un enfoque analítico detallado con visualizaciones claras, proporciona una visión comprensiva de los conflictos potenciales por el uso del agua, contribuyendo a la toma de decisiones informada en la gestión de recursos hídricos en cuencas agrícolas.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Contexto de Simulación y Caracterización del Área de Estudio

Este capítulo detalla los resultados obtenidos mediante el modelo SHABM, aplicado específicamente a la cuenca del río Longaví. En este análisis, se exploran exhaustivamente las características geográficas y socioeconómicas del sitio de estudio, así como la configuración y la implementación del modelo. Además, se evalúa cómo la supervisión y la variabilidad en la disponibilidad hídrica influyen el comportamiento de los agentes.

A través de las simulaciones, se ha podido observar la evolución temporal de las decisiones de los agentes y cómo estas interactúan con las dinámicas espaciales del entorno, especialmente bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua. Asimismo, se analiza la interacción entre los diversos usuarios del agua, proporcionando una visión integral de cómo estos factores confluyen para afectar la gestión del recurso hídrico.

Finalmente, se presentan conclusiones fundamentales que no solo resaltan los impactos observados sino que también ofrecen directrices clave para facilitar una gestión del agua más eficaz y sostenible. Estos hallazgos son esenciales para la toma de decisiones informadas y para la implementación de estrategias que aseguren un equilibrio entre la conservación del recurso hídrico y las necesidades de los usuarios en la cuenca.

3.1.1. Características Geográficas y Socioeconómicas del Sitio de Estudio

La cuenca del río Longaví, ubicada en la Región del Maule, Chile ($36^{\circ}08' S$, $71^{\circ}40' O$), se caracteriza por un clima mediterráneo con veranos secos y cálidos, y una precipitación media anual de 1.051 mm, concentrada entre mayo y agosto. Este territorio cubre una superficie de 676 km^2 y presenta una marcada estacionalidad hídrica, determinada por un régimen pluvio-nival (Fig. 7).

la Figura 7: ofrece una perspectiva integral del área de estudio, destacando la estructura de canales y el embalse principal que modulan la distribución del agua. La gestión de estos recursos es crítica para sostener la principal actividad económica de la región: la agricultura.

El río Longaví nace a 2.000 sobre el nivel del mar en la cordillera de los Andes y recorre 120 km, alcanzando un caudal promedio anual de $2,70 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. La disponibilidad hídrica está influenciada por dos períodos principales: lluvias y nevadas (mayo a agosto), y deshielo (septiembre a diciembre) (CR2, 2024). Estos patrones determinan la distribución y gestión del agua para actividades agrícolas.

La principal actividad económica de la cuenca del río Longaví es la agricultura, donde áreas con una alta fragmentación de parcelas de tierra (el 80 % son pequeños agricultores con parcelas de menos de 12 *ha*) coexisten con empresas forestales (Lillo-Saavedra et al., 2021). La demanda máxima de agua para actividades agrícolas ocurre entre los meses de septiembre a marzo. La infraestructura principal incluye un embalse de almacenamiento, con capacidad para 60 MM m^3 y 22 canales principales para la distribución del recurso hídrico entre los usuarios.

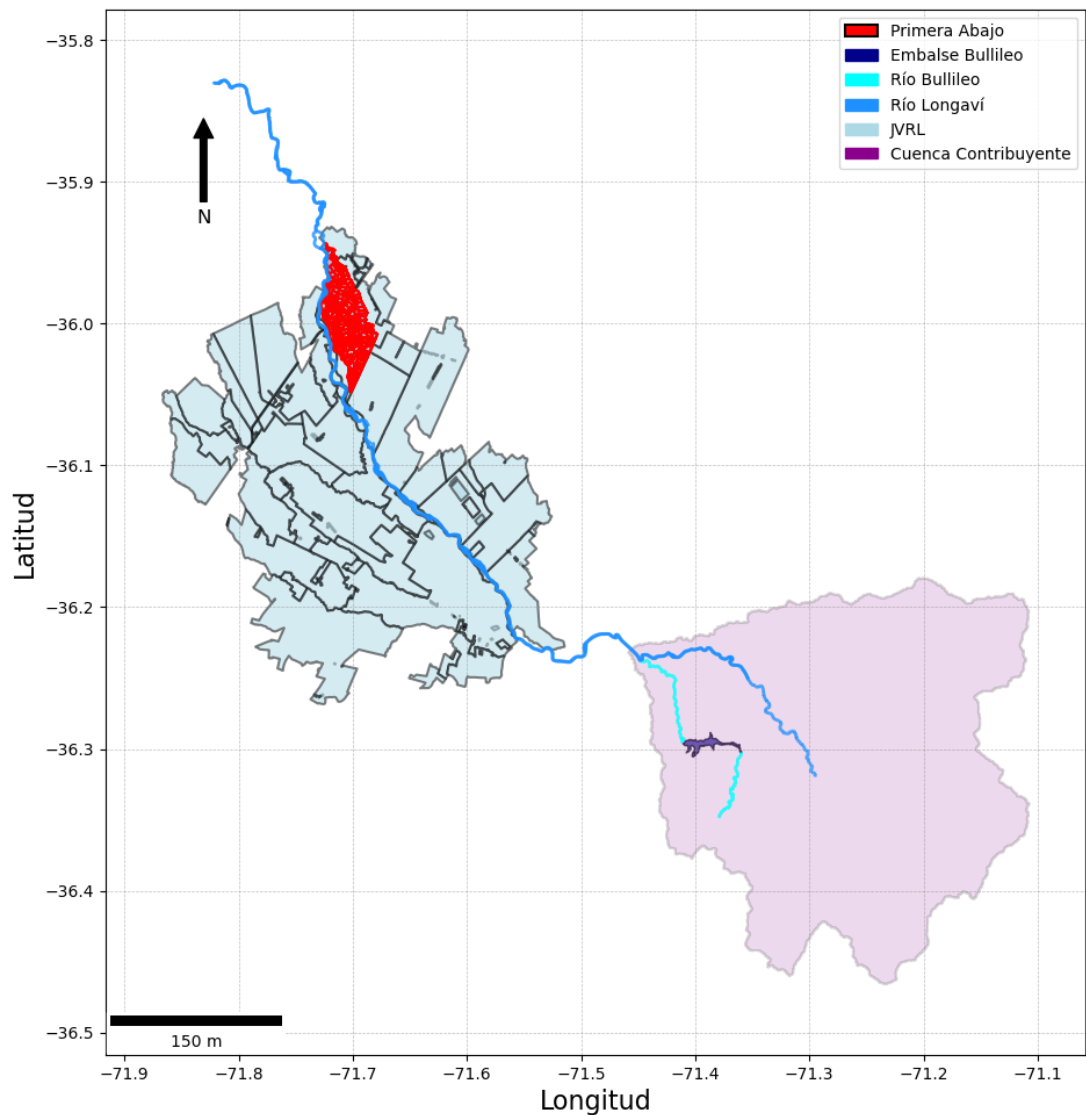


Figura 7: El sitio de estudio está ubicado en la cuenca del río Longaví, Región del Maule, Chile ($36^{\circ}08' S$, $71^{\circ}40' W$). La Junta de Vigilancia del Río Longaví (JVRL) gestiona 22 canales principales del río Longaví, incluyendo el canal principal “Primera Abajo”.

Fuente: Elaboración propia.

En julio de 2022, se realizó un estudio de campo para recopilar datos sobre la gestión del agua en la cuenca del río Longaví. Se llevaron a cabo ocho entrevistas cualitativas a informantes clave del canal “Primera Abajo”, incluyendo a la Presidenta, Secretaria, Celadores y Directivos. Las entrevistas se enfocaron en aspectos críticos como la distribución de agua, la infraestructura existente y las interacciones entre los usuarios. Además, se recopiló información detallada sobre el uso del agua, el uso de la

tierra y la administración del canal.

El trabajo de campo proporcionó información base sobre las decisiones de los usuarios del agua en las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUAs), así como sobre la gestión y operación de la distribución del agua a cargo de la Mesa Directiva (WB) llamada “Junta de Vigilancia del Río Longaví” (JVRL) ¹. Este WB está liderado por un directorio compuesto por representantes de los 22 canales principales que constituyen la JVRL. En cada canal, se establecen OUAs, que organizan a los usuarios finales del agua en torno a canales secundarios y terciarios, promoviendo una gestión descentralizada y adaptada a las necesidades locales.

El análisis de las entrevistas empleó técnicas de codificación temática para organizar y categorizar las respuestas, lo que permitió identificar patrones relacionados con el comportamiento de los usuarios en cuanto a la gestión del agua. Se aplicó la triangulación de datos, comparando las entrevistas con observaciones directas y registros administrativos de la JVRL para validar la información y obtener una comprensión completa de la situación.

Antes de realizar las entrevistas, se aseguró el consentimiento informado de todos los participantes, garantizando su comprensión completa sobre los objetivos del estudio y el manejo de su información personal. Las sesiones de observación participativa y los recorridos comentados complementaron este enfoque, utilizando mapas mentales para documentar las percepciones territoriales de los regantes y ayudar a identificar áreas de conflicto y manejo crítico del agua.

Los resultados del estudio evidenciaron cómo las políticas y decisiones de la JVRL influyen en la distribución del agua entre los usuarios de las OUAs. Esta estructura desempeña un papel fundamental en la gestión del recurso hídrico, especialmente frente a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de agua. Además, los

¹<https://juntariolongavi.cl/>

hallazgos del informe social proporcionaron información clave sobre las preferencias en la elección de cultivos, priorizando factores como el valor económico del producto y su resistencia a la sequía. Asimismo, se establecieron criterios para el cálculo de acciones de agua, datos esenciales para la caracterización de los agentes y la modelación de sus comportamientos.

3.1.2. Gestión del Agua

La gestión hídrica en la cuenca está organizada en torno a la Junta de Vigilancia del Río Longaví (JVRL), que administra la distribución del agua a través de 22 canales principales. Este sistema se basa en los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA), los cuales, a diferencia de otros sistemas, se expresan como una proporción del caudal disponible en ($l \cdot s^{-1}$), y no como un volumen fijo (Guillermo Donoso, Lictevout y Ri-naudo, 2020). Esto significa que la cantidad de agua que cada usuario puede extraer depende directamente de las condiciones hidrológicas.

La JVRL opera bajo dos modos de gestión:

- **Río Libre** (usualmente abril-septiembre): No existen restricciones en el uso del agua, ya que la oferta supera la demanda.
- **Riego Regulado** (dependiendo de las necesidades del sistema es en septiembre-marzo): La distribución se realiza de forma proporcional a la disponibilidad de agua en el embalse, asignando turnos para evitar conflictos (Herrera et al., 2019).

La semana de apertura del embalse fluctúa según requerimientos, lo que inicia el proceso de los turnos de riego los cuales son fundamentales en el período de riego regulado, ya que asignan a cada agricultor un número específico de días de riego según la proporción de DAA que posea.

3.1.3. Metodología y Datos de la Simulación

El modelo SHABM se implementó en tres Organizaciones de Usuarios del Agua (OUAs) dentro del canal principal “Primera Abajo” (Fig. 8). Durante cinco años de

simulación, se analizaron las decisiones de 22 agentes, distribuidos entre las tres OUAs, cada uno representando una parcela individual. Las entrevistas con los tomadores de decisión y la recopilación de datos sobre el terreno proporcionaron una base sólida para calibrar el modelo, asegurando que refleje de manera precisa las condiciones locales.

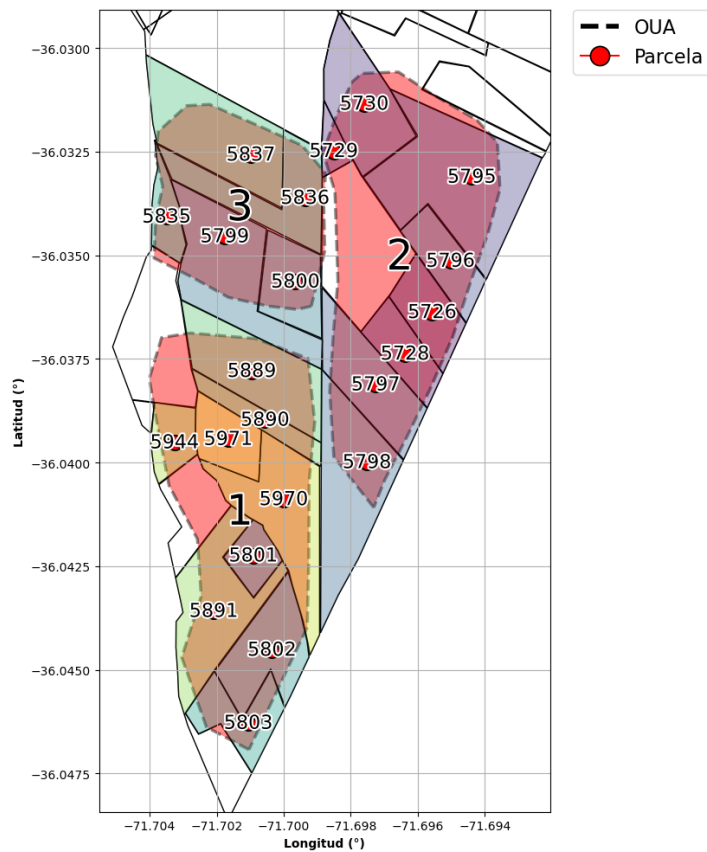


Figura 8: OUAs del canal principal “Primera Abajo” donde se aplicó el modelo SHABM.

Fuente: Elaboración propia.

Estos agentes se clasificaron en tres personalidades según su conducta prosocial:

- **Egoístas:** 10 agentes egoístas, que representan un 45 % de los agentes.
- **Neutrales:** 5 agentes neutrales, que representan un 23 %.
- **Colaboradores:** 7 agentes colaboradores, que representan un 32 %.

Esta clasificación permitió evaluar el impacto de la personalidad en las decisiones relacionadas con el uso del agua y en las respuestas a las condiciones del entorno, como supervisión y disponibilidad hídrica.

Otros elementos de la caracterización del área de estudio como el shapefile y el informe social permitieron generar la Tabla 3 la cual presenta el patrón de cultivo y superficie total plantada para cada OUA, mientras que la Tabla 4 resume los aspectos económicos y productivos de los cultivos utilizados en la simulación, basados en datos de ODEPA (2023).

OUA	Maíz	Trigo	Arándano	Alfalfa	Espárrago	Superficie Total (ha)
1	51 %	41 %	2 %	6 %	-	289
2	8 %	14 %	40 %	22 %	15 %	367
3	43 %	50 %	-	7 %	-	259

Tabla 3: Patrón de cultivos utilizado durante los 5 años de simulación para cada OUA.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Resumen de Aspectos Económicos y de Producción de los Cultivos.

Cultivo	Precio de Mercado \$ USD	Costo de Producción \$ USD ha ⁻¹	Rendimiento kg · ha ⁻¹	Riego
Maíz	0,29	1424,83	6440	Surco
Trigo	0,32	837,11	3450	Inundación
Arándano	1,89	18683,21	11500	Goteo
Alfalfa	0,10	1303,56	18000	Inundación
Espárrago	0,92	3183,49	5000	Surco

Fuente: Elaboración propia.

El patrón de cultivo definido permitió estimar la demanda hídrica específica de cada OUA utilizando coeficientes de cultivo ajustados ($\hat{K}c$), basados en imágenes satelitales

Sentinel-2 y datos FAO (Allen et al., 1998). Esto asegura que las estimaciones reflejen las características reales del área de estudio y que los agentes agrícolas enfrenten condiciones representativas de sus cultivos.

La demanda hídrica potencial (PWD) se calculó considerando la evapotranspiración ajustada (\hat{ET}_c , Eq. 3.1), que integra la evapotranspiración de referencia (ET_r) y coeficientes específicos de cada cultivo, ajustados según el índice de área foliar (LAI , Eq. 3.2). Las eficiencias de transporte y aplicación del agua se incluyeron para reflejar las condiciones reales de los canales y métodos de riego.

$$\hat{ET}_{c,i} = ET_{r_i} \times \hat{K}_{c,l} \quad (3.1)$$

$$\hat{K}_{c,l} = a_{kc_k} \times LAI_{k,l} + b_{kc_k} \quad (3.2)$$

$$PWD_{i,j} = \sum_{k=1}^n \frac{\hat{ET}_{c_k,i}}{CE_j} \quad (3.3)$$

Se utilizó una serie temporal de disponibilidad hídrica real de 5 años (2017-2022) para la zona de estudio. Desde la base de datos del Explorador Climático² (CR2, 2024), se extrajeron los valores medio diarios de caudal en el río Longaví, medidos en la estación fluviométrica La Quiriquina, para el período de “Río Regulado”, dejando fuera del análisis los períodos de “Río Libre” debido a que durante ese período la demanda de agua es menor que la disponibilidad.

En la Fig.9 se presenta las series temporales de caudales medios diarios disponibles en tres escenarios: real, aumentado en un 20 % respecto al real y disminuido en un 20 % respecto al real. Además, muestra la demanda hídrica potencial (PWD) total de los cultivos para cada OUA.

²<https://explorador.cr2.cl/>

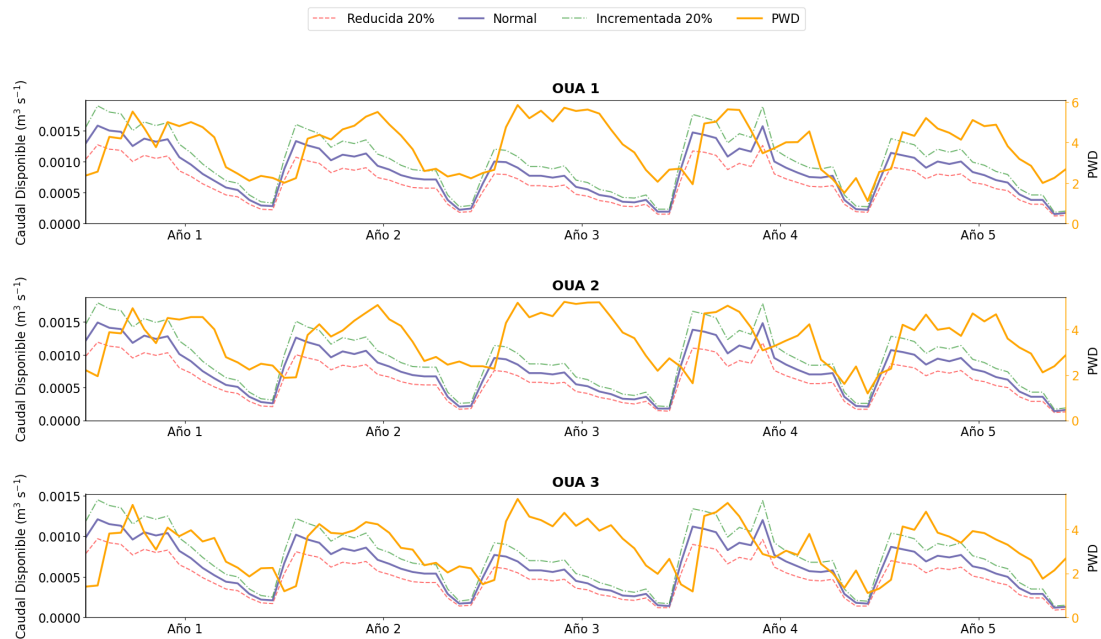


Figura 9: Evolución temporal del caudal disponible y la demanda hídrica potencial de todos los cultivos en cada una de las OUAs estudiadas.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la eficiencia de los sistemas de distribución y aplicación en los huertos, se consideró una eficiencia de transporte de un 75 %, correspondiente a canales no revestidos, que es la condición de la mayoría de los canales de la JVRL. Se consideraron diferentes eficiencias de aplicación según el método de riego: 30 % para riego por tendido, 45 % para riego por surco y 90 % para riego por goteo.

Para simular las pérdidas de agua durante su conducción hasta las parcelas, se estableció una eficiencia de sección. El canal se dividió en tres tramos, asignando a cada uno una eficiencia decreciente: sección 1 (90 %), sección 2 (80 %) y sección 3 (70 %).

3.2. Análisis de Resultados de la Simulación

3.2.1. Influencia de la Supervisión y Disponibilidad Hídrica

El análisis de los resultados se centró en dos dimensiones clave: los patrones de comportamiento de los agentes y las dinámicas espaciales que emergen de sus decisiones. Exploramos cómo la supervisión y la disponibilidad hídrica influyen en estos aspectos.

Dinámicas de Decisiones de los Agentes: El comportamiento de los agentes frente a diferentes niveles de supervisión revela patrones significativos que son esenciales para entender la gestión del recurso hídrico en la cuenca. La figura 10 muestra cómo la personalidad de los agentes cómo las distintas personalidades de los agentes egoístas, neutrales y colaboradores responden a los distintos niveles de supervisión y disponibilidad hídrica.

La Figura 10 ilustra cómo los agentes toman decisiones sobre respetar o ignorar turnos de riego bajo distintas condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica, representadas en tres escenarios: reducción del 20 %, nivel real, y aumento del 20 % respecto al nivel real de disponibilidad. Cada escenario incluye gráficos que correlacionan tres niveles de supervisión (10 %, 50 %, y 90 %) con las decisiones de los agentes, estos comportamientos se analizan para agentes clasificados como Egoístas, Neutrales y Colaboradores, destacando la interacción entre la supervisión, la disponibilidad hídrica y la conducta prosocial.

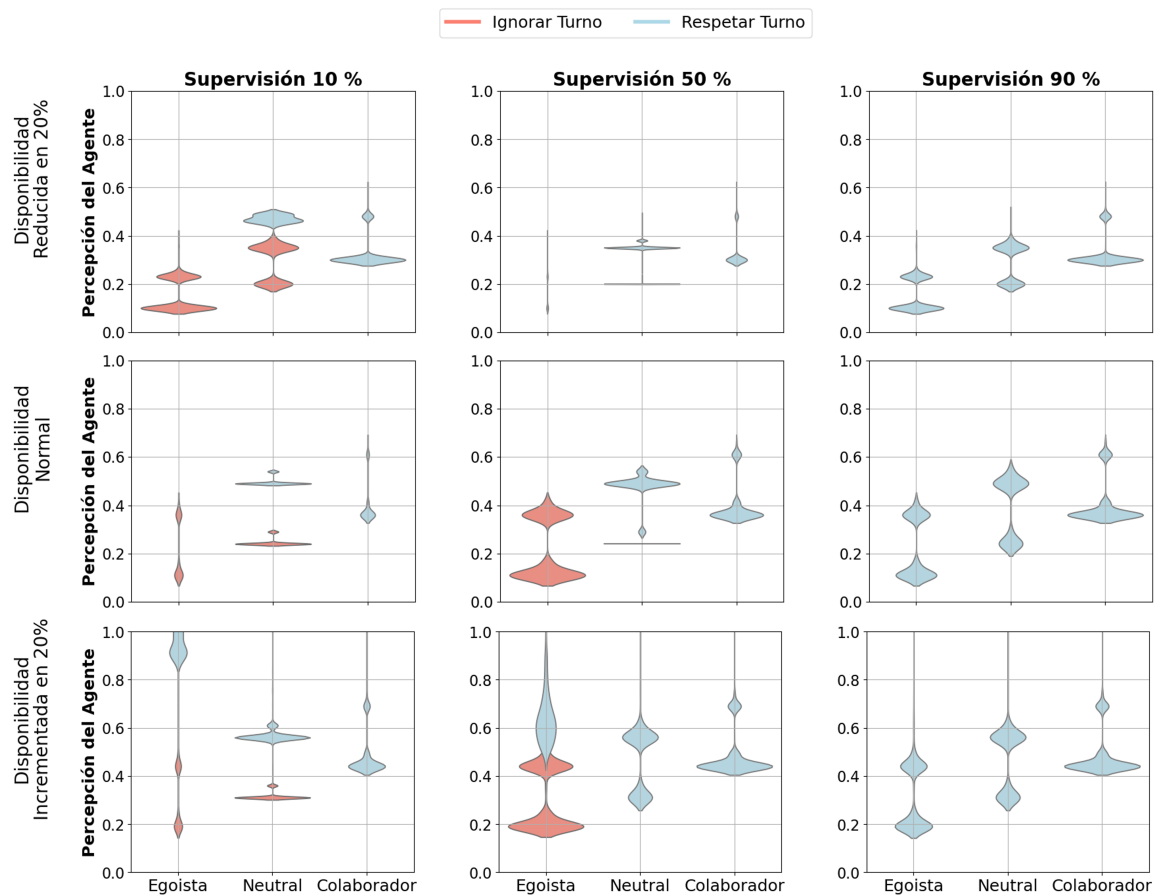


Figura 10: Relación entre personalidad y cumplimiento de turnos bajo variadas condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica.

Evolución Temporal del Comportamiento de los Agentes: A lo largo de los cinco años simulados, los agentes egoístas mostraron una disminución gradual en la frecuencia de ignorar turnos, especialmente cuando se implementaron niveles más altos de supervisión. Este cambio refleja una adaptación temporal progresiva a las reglas del sistema (Fig. 11).

La Figura 11 ilustra cómo la disponibilidad hídrica y los niveles de supervisión influyen en la evolución temporal de las decisiones de los agentes F respecto al cumplimiento de los turnos de riego a lo largo de cinco años. La representación gráfica destaca la adaptación de los agentes ante diferentes escenarios de disponibilidad hídrica: reducida en un 20%, nivel normal, e incrementada en un 20%. Los agentes egoístas, inicialmente más propensos a ignorar turnos bajo baja supervisión, muestran una adaptación significativa a medida que la supervisión aumenta, especialmente evidente a

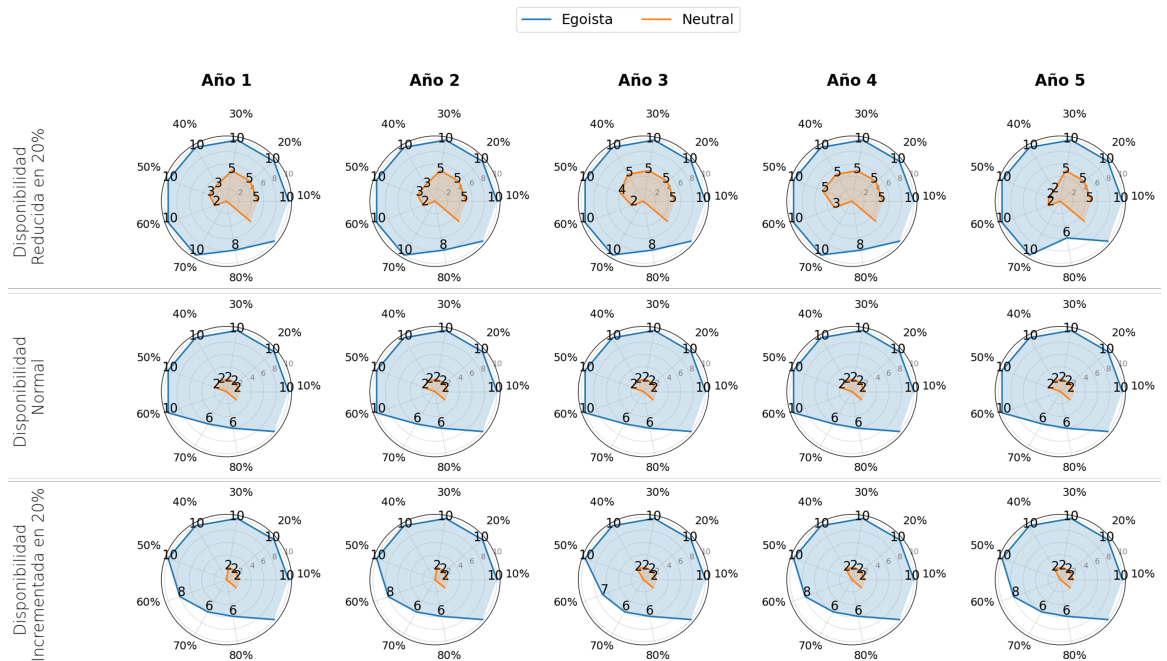


Figura 11: Evolución temporal de las decisiones bajo distintos niveles de supervisión.

partir del tercer año. En contraste, los agentes neutrales mantienen un comportamiento más constante y ajustado a las normas, independientemente de las variaciones en la disponibilidad hídrica y los niveles de supervisión. Este patrón sugiere que una supervisión efectiva y ajustada a las condiciones reales de disponibilidad hídrica es esencial para gestionar el uso equitativo y sostenible del recurso hídrico.

3.2.2. Dinámicas Espaciales y Conflictos Potenciales

La distribución espacial de las decisiones de riego y los consiguientes conflictos evidencian cómo las interacciones entre los agentes pueden originar complejas dinámicas. Estos patrones subrayan la necesidad de estrategias de supervisión efectivas y adaptativas que puedan abordar y mitigar las tensiones emergentes en la gestión de los recursos hídricos.

Mapa de Densidad de Decisiones y Conflictos: Este análisis detecta las zonas donde los turnos de riego son habitualmente ignorados, indicando áreas propensas a conflictos entre los usuarios del agua, como se ilustra en la Figura 12. Esta geoespacia-

lización resalta la necesidad de implementar estrategias de supervisión efectivas para mitigar tensiones y promover una gestión sostenible del recurso hídrico.

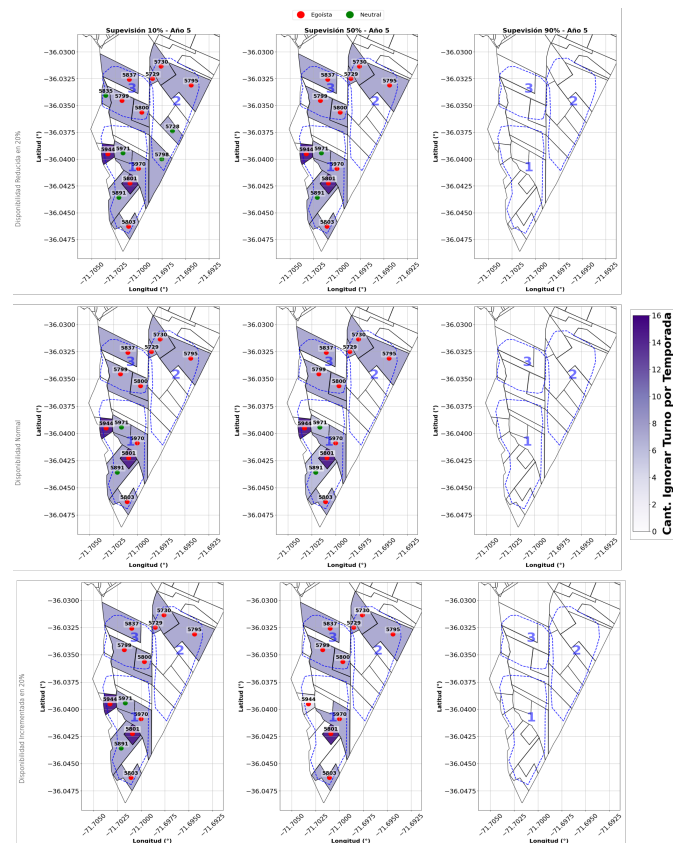


Figura 12: Mapa de la densidad de turnos de riego ignorados, indicando áreas potenciales de conflicto.

La Figura 12 muestra la distribución de turnos de riego ignorados bajo diferentes condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica, identificando áreas con potenciales conflictos. En condiciones de escasez de agua y baja supervisión, se observa un incremento en la frecuencia de ignorar turnos, particularmente entre los agentes egoístas, lo que sugiere puntos de tensión significativos entre los usuarios del agua. Conforme aumenta la supervisión, la cantidad de turnos ignorados disminuye, lo que indica la efectividad de una fiscalización rigurosa para mantener el cumplimiento de las normas de riego. Esta tendencia es menos pronunciada en condiciones de mayor disponibilidad hídrica, donde la competencia por el recurso disminuye y, por lo tanto, mejora la adherencia a los turnos establecidos.

Influencias Interagentes y Gestión de Conflictos: Las interacciones entre los agentes, influenciadas por la supervisión, muestran cómo los comportamientos de los agentes pueden afectar a la comunidad en general (Fig. 13). Con esta representación se busca mostrar turno afectado y el turno que origina la alteración (Influencia que da peso a la flecha →).

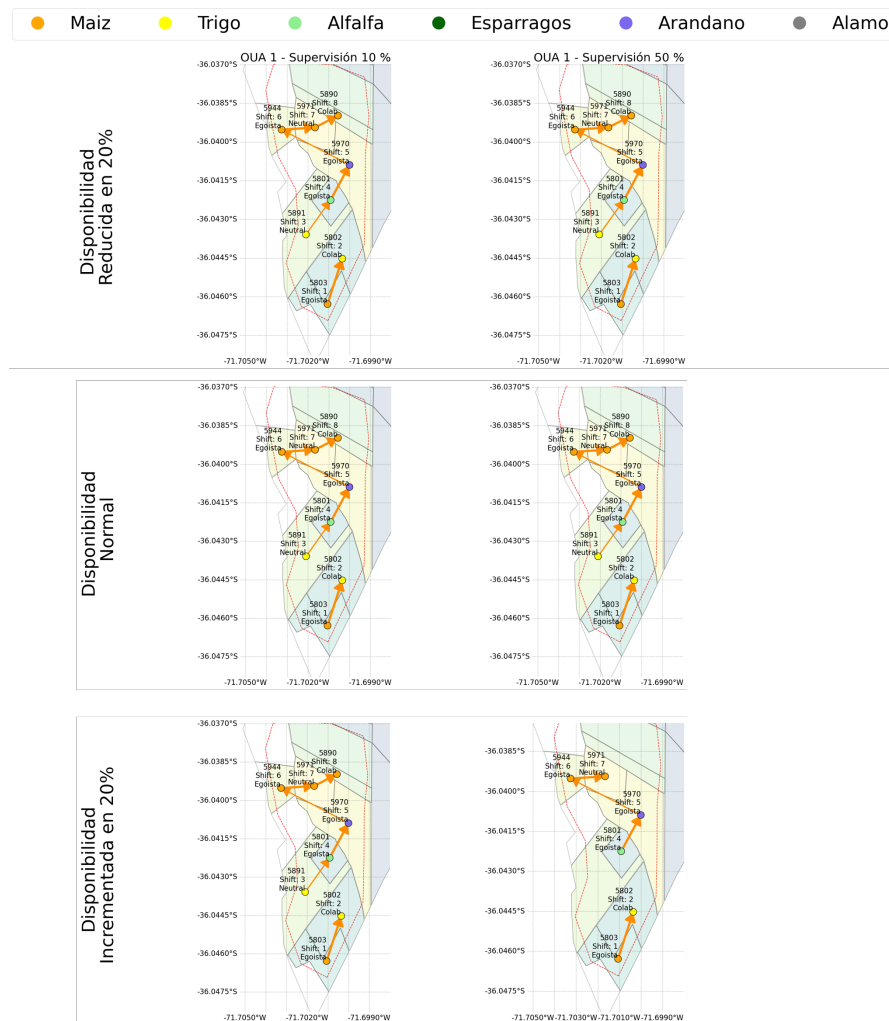


Figura 13: Influencia de los Agentes F bajo distintas condiciones de supervisión y disponibilidad hídrica.

La Figura 13 ilustra la compleja dinámica interagente bajo variados regímenes de supervisión y condiciones hídricas. Esta representación demuestra que los comportamientos disruptivos, especialmente de los agentes egoístas bajo supervisión deficiente, pueden generar conflictos significativos que afectan principalmente a los agentes neu-

trales y colaboradores. Estos hallazgos subrayan la importancia crítica de implementar estrategias robustas de supervisión para mitigar dinámicas adversas y promover un manejo equitativo del recurso hídrico.

Durante el periodo crítico del riego regulado, caracterizado por la asignación de turnos, es vital comprender cómo las omisiones de turno por parte de ciertos agentes impactan directamente a otros que sí cumplen con sus asignaciones. La gestión adecuada de estos turnos es esencial para asegurar la equidad y eficiencia en la distribución del agua.

Además, se lleva a cabo una cuantificación de las interrupciones en los turnos de riego, convertidas en litros por segundo ($l \cdot s^{-1}$) y acumuladas por m^3 por temporada, proporcionando una perspectiva cuantitativa sobre el impacto de estas interacciones. Por ejemplo, si un Agente F del Turno 1 (Origen), no habilitado, omite su turno en los días 101 y 102, esto afecta al Turno 2, que está habilitado en esos días. Este análisis se muestra en la Tabla 5, permitiendo identificar patrones de conflicto y diseñar estrategias basadas en datos para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

Tabla 5: Influencia entre Turnos en OUA 1

Día _{Afectado}	Turno _{Orig.}	Perso _{Orig.}	Turno _{Afect.}	Tasa _{Afect.}	Tasa _{Final}
101	1	Egoísta	2	1,45	0,29
102	1	Egoísta	2	1,45	0,29
117	1	Egoísta	2	1,68	0,34
118	1	Egoísta	2	1,68	0,34

Fuente: Elaboración propia.

Esta Tabla (5) muestra los datos de las parcelas y turnos afectados cuando un Agente ignora su turno bajo una supervisión del 10 % en la OUA 1 en el Año 1. A partir de la cuantificación de las interrupciones en periodo de turno, se puntualiza al afectado y el turno que origina la alteración (interrupción que da peso a la flecha → en la figura 13). Esta información se georeferencia en las distintas OUAs, parcelas, días y temporadas involucradas. El resultado de este análisis, muestra las siguientes pérdidas de agua por temporada:

- Parcela 5803 (Turno 1) → Parcela 5802 (Turno 2): pérdida de $13,63 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ en 15 días de turno con una pérdida total de agua de $1.177,63 \text{ m}^3$.

La cuantificación detallada de las interacciones entre turnos de riego facilita la anticipación de conflictos de manera espacio-temporal, proveyendo datos esenciales para la toma de decisiones. Esta metodología permite la creación de mapas detallados que identifican a los agentes, turnos, personalidades y cultivos implicados, facilitando la visualización de las dinámicas durante períodos críticos.

Resultados Generales: Los hallazgos enfatizan la necesidad de supervisión efectiva y suficiente disponibilidad hídrica para mitigar conflictos y promover una gestión sostenible del agua. Las estrategias adaptativas, que consideran la diversidad de personalidades de los agentes y las condiciones ambientales fluctuantes, son fundamentales para incrementar la cooperación y la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

Los resultados ilustran tres factores cruciales para una gestión hídrica efectiva:

- **Supervisión Alta:** Fundamental para minimizar interrupciones y conflictos, garantizando el cumplimiento de las regulaciones de riego.
- **Disponibilidad Hídrica:** Esencial para suavizar las diferencias entre personalidades de agentes y adaptar las prácticas de riego a la realidad de la disponibilidad de agua.
- **Adaptación:** La evolución constante de los agentes, incluyendo a los más reticentes, es crucial para su alineación progresiva con las normativas y la colaboración efectiva en la gestión del agua.

Capítulo 4

Discusión

Los resultados obtenidos en esta tesis refuerzan el valor de los Modelos Basados en Agentes Socio-Hidrológicos (SHABM) como herramientas para analizar y predecir conflictos relacionados con la gestión del agua a escala de cuenca. La integración de diversas fuentes de datos permitió una representación sistémica del comportamiento socio-hidrológico, donde las interacciones entre la disponibilidad de agua, la supervisión y las conductas de los agentes emergieron como factores críticos para una gestión efectiva y equitativa de los recursos hídricos.

La elección de ABM como el enfoque principal para esta investigación se justifica por su alineación con los objetivos específicos del estudio, que requieren el análisis detallado de las interacciones individuales y las respuestas a las políticas. La integración de otros modelos como los sistemas dinámicos y la simulación de Monte Carlo podría enriquecer aún más nuestra comprensión y capacidad para gestionar efectivamente los recursos hídricos en el futuro.

Uno de los hallazgos más destacados es la relación observada entre la disponibilidad de agua y el comportamiento de los agentes F, especialmente los clasificados como egoístas. En escenarios de escasez hídrica, definidos por una reducción del 20 % respecto a los niveles reales, los agentes egoístas mostraron una propensión notoriamente mayor a ignorar los turnos de riego, especialmente bajo condiciones de supervisión mí-

nima. Este comportamiento concuerda con estudios previos que asocian la competencia por recursos limitados con un aumento en la conducta oportunista y egoísta (Döring, K. Kim y Swain, 2024). Estos resultados sugieren que, en contextos de escasez, los incentivos para priorizar el beneficio individual sobre el colectivo aumentan, lo que agrava los conflictos y dificulta la distribución equitativa del recurso.

La discusión sobre los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA) y las prácticas de asignación es fundamental para entender estos comportamientos. Los DAA establecen un marco legal que define cómo se distribuye el agua entre los usuarios. Sin embargo, la asignación efectiva de agua a menudo depende de acuerdos comunitarios que pueden incluir sistemas de turnos, especialmente en zonas rurales donde la supervisión estatal es limitada (Bauer, 2004; G. Donoso, 2015). En estas comunidades, los acuerdos de turnos ayudan a administrar la escasez de manera que se mitigue la competencia y se promueva un uso más equitativo del agua.

En contraposición, los agentes colaboradores mantuvieron patrones de conducta relativamente estables independientemente de los niveles de disponibilidad de agua, evidenciando el impacto de los rasgos prosociales en la resiliencia frente al estrés hídrico. Este comportamiento indica la importancia de fomentar la colaboración como estrategia para mitigar conflictos, ya que los agentes con tendencias prosociales parecen priorizar la sostenibilidad del sistema en lugar de maximizar beneficios individuales a corto plazo. Esta diferencia entre tipos de agentes enfatiza la necesidad de considerar características individuales en el diseño de estrategias de manejo hídrico, alineándose con estudios que destacan la influencia de los factores de conducta prosocial en las decisiones colectivas (Ataei, Karimi y Es'haghi, 2022).

Un aspecto central que emergió de las simulaciones fue la efectividad de la supervisión como mecanismo para reducir conflictos potenciales. Los resultados muestran que niveles elevados de supervisión (90 %) disminuyeron significativamente el número de turnos de riego ignorados para todos los tipos de agentes, siendo este efecto particular-

mente pronunciado en los agentes egoístas. Este hallazgo concuerda con investigaciones previas que destacan el papel del monitoreo y la aplicación de normas como herramientas clave para garantizar el cumplimiento de reglas en sistemas de manejo de recursos (Charakorn, Manoonpong y Dilokthanakul, 2023; Hongxin Zhang et al., 2023). Sin embargo, es importante destacar que los agentes colaboradores mostraron una menor sensibilidad a los niveles de supervisión, lo que refuerza la idea de que estrategias diferenciadas, adaptadas al tipo predominante de agentes en cada contexto, podrían ser más eficaces. Este equilibrio entre la aplicación de normas y la construcción de confianza en los usuarios es crucial para alcanzar una gestión sostenible y equitativa, tal como lo discuten Jiménez et al. (2020).

Además de los patrones de conducta, el análisis espacial de las simulaciones (Figs. 12 y 13) reveló puntos críticos de conflicto concentrados en áreas dominadas por agentes egoístas y bajo una baja supervisión. Estas áreas representan zonas de mayor vulnerabilidad al conflicto y destacan la importancia de implementar intervenciones focalizadas que consideren las particularidades de cada región. La heterogeneidad espacial en el potencial de conflicto subraya la necesidad de estrategias de gestión hídrica que no solo sean efectivas a nivel global, sino también sensibles a las dinámicas locales dentro de una Organización de Usuarios de Agua (OUA).

El componente temporal de las simulaciones ofreció información valiosa sobre los procesos de adaptación de los agentes. La estabilización de patrones de comportamiento observada después del tercer año sugiere que los agentes ajustan sus estrategias basándose en la experiencia acumulada y en las respuestas del sistema a sus acciones. Este hallazgo tiene implicaciones directas para el diseño de políticas de gestión hídrica, ya que indica que cualquier cambio en las reglas o condiciones del sistema requerirá un período inicial de ajuste, durante el cual las dinámicas del sistema podrían ser más inestables.

A pesar del potencial demostrado por los SHABM, es importante reconocer ciertas

limitaciones inherentes al modelo. La precisión y validez de los resultados dependen en gran medida de la calidad y exhaustividad de los datos de entrada. Mientras que la información técnica y operativa era accesible, la recopilación de datos sociales, particularmente aquellos relacionados con las motivaciones, percepciones y comportamientos de los agricultores, presentó mayores desafíos. Estas limitaciones resaltan la importancia de adoptar enfoques interdisciplinarios que combinen métodos de las ciencias sociales y ambientales para informar mejor los modelos. Adicionalmente, futuras investigaciones podrían explorar la inclusión de factores emocionales y psicológicos más detallados para enriquecer la representación de los agentes, siguiendo las recomendaciones de autores como Mehrabian (1996) y John, Naumann y Soto (2008).

Por otro lado, la implementación técnica del modelo demostró ser accesible gracias al uso de Python como lenguaje de programación, facilitando la integración de bibliotecas para análisis y visualización de datos, así como la conexión con bases de datos no relacionales como MongoDB. Sin embargo, el desarrollo de agentes virtuales que responden dinámicamente a cambios en el entorno sigue presentando desafíos, particularmente en la integración de factores individuales complejos como emociones, percepciones y conocimientos.

Finalmente, basado en los resultados de las simulaciones con eficiencia de transporte de agua a un 75 %, se infiere que con mejoras en la infraestructura, como el revestimiento de canales o la construcción de embalses adicionales, aumentaría no solo la eficiencia del transporte de agua, sino que también mejoran la percepción de los agentes sobre el sistema, reduciendo así el incumplimiento de normas. Estas conjeturas refuerzan la importancia de adoptar estrategias integrales que consideren tanto mejoras técnicas como intervenciones sociales para promover una gestión hídrica de anticipación.

En resumen, este estudio demuestra la importancia de integrar aspectos sociales, técnicos y espaciales en los modelos de gestión hídrica. La capacidad de los SHABM

para simular dinámicas complejas y prever conflictos los posiciona como herramientas valiosas para el diseño de políticas más equitativas y sostenibles. Sin embargo, el éxito de estas herramientas dependerá de la disponibilidad de datos precisos, el desarrollo de enfoques interdisciplinarios y la incorporación de perspectivas locales para capturar mejor la complejidad de los sistemas socio-hidrológicos.

Conclusiones

La investigación desarrolló un marco metodológico integral que combina elementos de socio-hidrología y modelos basados en agentes (SHABM) para analizar dinámicas complejas en la cuenca del río Longaví. Este enfoque permitió identificar patrones emergentes en las interacciones entre agentes y recursos hídricos, integrando aspectos sociales, ambientales y económicos. La herramienta tecnológica constituye un modelo replicable y adaptable a otras regiones agrícolas afectadas por problemas de escasez hídrica, proporcionando una base robusta para la planificación y gestión hídrica en contextos similares.

El modelo se diseñó siguiendo el protocolo ODD (*Overview, Design concepts, and Details*, en español: Descripción General, Conceptos de Diseño y Detalles), asegurando una representación estructurada y transparente de las dinámicas socio-hidrológicas. En este marco, se definieron objetivos claros para analizar cómo las decisiones individuales y colectivas de los agentes afectan la sostenibilidad del sistema hídrico. Los escenarios desarrollados consideraron tres condiciones de disponibilidad hídrica (déficit, normal y aumentada) y diferentes niveles de supervisión (10 %, 50 %, 90 %), permitiendo evaluar cómo estas variables afectan el comportamiento emergente de los agentes.

La validación del modelo se fundamentó en un enfoque cualitativo, reflejando las dinámicas socio-hidrológicas percibidas en el canal Primera Abajo. Aunque no se cuentan con registros empíricos formales de conflictos, el informe social permitió incorporar desigualdades en la distribución del agua, prácticas informales de acceso y tensiones derivadas de la variabilidad hídrica. Estas percepciones, integradas al modelo mediante el protocolo ODD, garantizaron una representación coherente de las interacciones entre agentes y el sistema hídrico. Los patrones emergentes reproducidos por el modelo, como tensiones por déficit hídrico, conflictos por baja supervisión y respuestas diferenciadas a niveles variables de fiscalización, validaron que el modelo es capaz de representar dinámicas consistentes con sistemas socio-hidrológicos similares.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del modelo frente a variaciones en parámetros clave. Este análisis incluyó los niveles de supervisión, la disponibilidad hídrica y las proporciones iniciales de personalidades de los agentes (egoístas, neutrales y colaboradores). Los resultados mostraron que los patrones emergentes se mantuvieron consistentes: en escenarios de supervisión baja y déficit hídrico se incrementaron las tensiones y los turnos ignorados, mientras que la supervisión alta fomentó un mayor respeto a las reglas, incluso bajo condiciones adversas. Estos resultados validan la hipótesis de que la integración de SHABM permite identificar y prever de manera efectiva conflictos por el uso del agua en sistemas complejos.

Finalmente, los hallazgos subrayan la importancia de combinar aspectos sociales, ambientales y comportamentales para mejorar la gestión hídrica. El modelo constituye una herramienta útil no solo para analizar dinámicas actuales, sino también para explorar escenarios futuros y proponer estrategias de manejo adaptativas. Sin embargo, la incorporación de datos empíricos en investigaciones futuras fortalecerá la validación del modelo y permitirá ampliar su aplicabilidad en contextos de mayor complejidad, particularmente bajo condiciones de alta variabilidad hídrica y gobernanza heterogénea.

4.1. Limitaciones y trabajos futuros

Una de las principales limitaciones de este estudio fue la caracterización de la dimensión social en el área de estudio, particularmente en lo relativo a las motivaciones, percepciones y reacciones de los agentes agrícolas. La dificultad inherente de representar de manera precisa comportamientos humanos en sistemas dinámicos y complejos planteó desafíos importantes para la recopilación de datos sociales. Estas limitaciones pudieron influir en la capacidad del modelo para capturar ciertos patrones emergentes relacionados con la cooperación y el conflicto entre los agentes. Trabajos futuros deberían enfocarse en estrategias metodológicas más específicas, como cuestionarios

estandarizados y entrevistas estructuradas, que permitan obtener datos más representativos sobre las interacciones humanas y su impacto en los sistemas hídricos.

Además, es necesario ampliar el alcance del modelo para incorporar sistemas sociales más complejos en el análisis de la gestión hídrica. Esto incluye la evaluación de interacciones normativas y comunitarias, así como su influencia en la toma de decisiones de los agentes. Dado que las normas sociales y las percepciones colectivas juegan un papel determinante en las dinámicas de cooperación y conflicto, futuros trabajos podrían integrar agentes adicionales que representen entidades clave como organizaciones de usuarios del agua (OUA), juntas de vigilancia o comunidades locales. Esto permitiría analizar con mayor detalle cómo estas entidades afectan la dinámica general del sistema y contribuyen a la sostenibilidad.

Finalmente, esta investigación no abordó exhaustivamente las respuestas de los agentes ante interacciones complejas, como los efectos acumulativos de sanciones o los cambios en las condiciones de cooperación a lo largo del tiempo. Esto abre una línea de investigación para desarrollar modelos que integren procesos adaptativos y dinámicas emergentes en escenarios socio-hidrológicos. Por ejemplo, se podrían explorar cómo sanciones progresivas o incentivos específicos influyen en el comportamiento de los agentes y en la sostenibilidad del sistema. Este enfoque permitiría mejorar la capacidad de los modelos para representar comportamientos colectivos en contextos cambiantes, fortaleciendo su utilidad como herramientas de apoyo para la planificación y toma de decisiones en la gestión hídrica.

Bibliografía

- Allen, Richard G. et al. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: Food y Agriculture Organization of the United Nations.
- An, Li, Daniel G. Brown et al. (2021). «Modeling Coupled Human-Natural Systems: Review of Agent-Based Modeling Approaches». En: *Ecological Modelling* 457, pág. 109685. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109685.
- An, Li, Volker Grimm et al. (2021). «Challenges, tasks, and opportunities in modeling agent-based complex systems». En: *Ecological Modelling* 457, pág. 109685. ISSN: 0304-3800. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109685>.
- Arriagada Puentes Andrés, et al. (2018). *Manual intermedio para dirigentes de organizaciones de usuarios de aguas*. Inf. téc. Chile. Comisión Nacional de Riego. URL: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26931>.
- Ataei, Pouria, Hamid Karimi y Seyed Reza Es'haghi (2022). «Socio-cognitive analysis of farmers' water conservation behaviour: The case of the Kavar plain, Iran». En: *Science Progress* 105.4, pág. 00368504221128777. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504221128777>.
- Banker, Kyle (2011). *MongoDB in Action*. Manning Publications.
- Barlow, Maude (2010). *Blue Covenant: The Global Water Crisis and the Coming Battle for the Right to Water*. New York: New Press. ISBN: 978-1595584533.
- Bauer, C. J. (2004). *Siren Song: Chilean Water Law as a Model for International Reform*. RFF Press.
- Baumsteiger, Rachel y Jason T. Siegel (2019). «Measuring Prosociality: The Development of a Prosocial Behavioral Intentions Scale». En: *Journal of Personality Assessment* 101.3, págs. 305-314. DOI: 10.1080/00223891.2017.1411918.

- Bechara, Antoine, Hanna Damasio y Antonio R. Damasio (mar. de 2000). «Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex». En: *Cerebral Cortex* 10.3, págs. 295-307. ISSN: 1047-3211. DOI: 10.1093/cercor/10.3.295. eprint: <https://academic.oup.com/cercor/article-pdf/10/3/295/9751042/100295.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/cercor/10.3.295>.
- Becker, Gary S. (1968). «Crime and Punishment: An Economic Approach». En: *Journal of Political Economy* 76.2, págs. 169-217. DOI: 10.1086/259394.
- Blair, P y W Buytaert (2016). «Socio-hydrological modelling: a review asking "why, what and how?"» En: *Hydrol. Earth Syst. Sci* 20, págs. 443-478. DOI: 10.5194/hess-20-443-2016. URL: www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/443/2016/.
- Boelens, Rutgerd et al. (2017). *Hydrosocial territories and water equity: theory, governance, and sites of struggle*. Routledge.
- Bonabeau, Eric (2002). «Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems». En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.suppl 3, págs. 7280-7287.
- Brown, L. y A. Martin (2021). «Standardizing Randomness: Best Practices for Random Seed Selection in Machine Learning». En: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 31.3, págs. 12-25. DOI: 10.1145/3456789.
- Budds, Jessica (2013). «Water, Power and the Production of Neoliberalism in Chile: The Politics of Market Water». En: *Economy and Society* 42.2, págs. 202-224. DOI: 10.1080/03085147.2012.718626.
- Charakorn, Rujikorn, Poramate Manoonpong y Nat Dilokthanakul (2023). «Generating Diverse Cooperative Agents by Learning Incompatible Policies». En: *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. URL: <https://iclr.cc/virtual/2023/oral/12527>.
- Chodorow, Kristina (2013). *MongoDB: The Definitive Guide*. O'Reilly Media, Inc.
- Choquette-Levy, Nicolas et al. (2024). «Prosocial preferences improve climate risk management in subsistence farming communities». En: *Nat. Sustain.*
- Connor, Robert y Adam Smith (2018). «Funding gaps in water infrastructure: A business approach». En: *Water Finance and Management* 5 (2), págs. 22-30.
- CR2 (2024). *Center for Climate and Resilience Research*. <https://www.cr2.cl>. Accessed: 2024-03-14.

- Di Baldassarre, Giuliano et al. (2019). «Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals». En: *Water Resources Research* 55.8, págs. 6327-6355.
- Donoso, G. (2015). «Water governance in Chile: Availability, management and climate change». En: *Journal of Hydrology* 522, págs. 474-483.
- Donoso, Guillermo, Elisabeth Lictevout y Jean-Daniel Rinaudo (2020). «Evolving Water Management Institutions in the Chilean Andes». En: *Water* 12.10, pág. 2803. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w12102803. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2803>.
- Döring, Stefan, Kyungmee Kim y Ashok Swain (2024). «Integrating socio-hydrology, and peace and conflict research». En: *Journal of Hydrology* 633, pág. 131000. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131000>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169424003950>.
- Edmonds, Bruce y Ruth Meyer (2019). «Simulating Social Complexity: A Handbook». En: *Springer Series in Complexity*. DOI: 10.1007/978-3-662-49759-8.
- Elsawah, Sondoss et al. (2020). «Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling». En: *Socio-Environmental Systems Modelling* 2, pág. 16226.
- Elshafei, Yasmina et al. (2014). «A prototype framework for models of socio-hydrology: Identification of key feedback loops and parameterisation approach». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 18.6, págs. 2141-2166. DOI: 10.5194/hess-18-2141-2014. URL: <https://hess.copernicus.org/articles/18/2141/2014/>.
- Epstein, Joshua M. (2002). «Modeling Civil Violence: An Agent-Based Computational Approach». En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.Suppl 3, págs. 7243-7250. DOI: 10.1073/pnas.092080199.
- (2006). *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- FAO (2022). «The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at breaking point». En: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Fragaszy, Stephen R, Rachael McDonnell y Alvar Closas (2021). «Creating a hydrosocial territory: water and agriculture in the Liwa Oasis». En: *Journal of Political Ecology* 28.1, págs. 286-308.
- Gain, Animesh K et al. (2021). «Social-ecological system approaches for water resources management». En: *International journal of sustainable development & world ecology* 28.2, págs. 109-124.

- Gamma, Erich et al. (1994). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional.
- Ghoreishi, Mohammad, Saman Razavi y Amin Elshorbagy (2021). «A review of agent-based modeling (ABM) concepts, applications, and prospects for sustainable water resources management». En: *Earth-Science Reviews* 221, pág. 103827. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103827.
- Gilbert, Nigel (2005). *Simulation for the Social Scientist*. Maidenhead, UK: Open University Press.
- Global Water Partnership (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*. Asociación Global de Aguas, Estocolmo (Suecia)., pág. 76. ISBN: 91-631-0058-4.
- Grimm, Volker, Urs Berger, Finn Bastiansen et al. (2006). «A standard protocol for describing individual-based and agent-based models». En: *Ecological Modelling* 198.1-2, págs. 115-126.
- Grimm, Volker, Urs Berger, Donald L. DeAngelis et al. (2010). «The ODD protocol: A review and first update». En: *Ecological Modelling* 221.23, págs. 2760-2768.
- Grimm, Volker, Gary Polhill y Julia Touza (2017). «Documenting social simulation models: The ODD protocol as a standard». En: *Understanding Complex Systems*. Ed. por Bruce Edmonds y Ruth Meyer. 9783319669472. Cham: Springer International Publishing, págs. 349-365. ISBN: 978-3-319-66948-9. DOI: 10.1007/978-3-319-66948-9_15. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66948-9_15.
- Grimm, Volker, Steven F Railsback et al. (2020). «The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism». En: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 23.2.
- Gu, Jiali et al. (2021). «Sociohydrology: An Effective Way to Reveal the Coupled Evolution of Human and Water Systems». En: *Water Resources Management* 35 (14), págs. 4995-5010.
- Guo, Liang et al. (2023). «Simulation of agricultural water users under a water-saving compensation policy: An ABM approach». En: *Water Policy* 25.3, págs. 456-474.
- Guo, Naliang et al. (2022). «Modeling agricultural water-saving compensation policy: An ABM approach and application». En: *Journal of Cleaner Production* 344, pág. 131035. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131035>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622006692>.

- Herrera, Mauricio et al. (2019). «Understanding water disputes in Chile with text and data mining tools». En: *Water International* 44.3, págs. 302-320. DOI: 10.1080/02508060.2019.1599774.
- Huber, Lisa, Nico Bahro et al. (2018). «Agent-based modelling of a coupled water demand and supply system at the catchment scale». En: *Sustainability* 11.1, pág. 21.
- Huber, Lisa, Johannes Rüdissler et al. (2021). «Agent-based modelling of water balance in a social-ecological system: A multidisciplinary approach for mountain catchments». En: *Science of The Total Environment* 755, pág. 142962.
- Huber, T. y J. Smith (2022). «Agent-based modeling in water resources: Emerging trends and applications». En: *Water Policy* 24, págs. 1001-1017.
- Inc., MongoDB (2024). *MongoDB: The database for modern applications*. <https://www.mongodb.com/>.
- IPCC (2023). «Climate Change 2023: The Physical Science Basis». En: *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- James, C.L. y K.L. Bradshaw (2023). «Agent-based model development of a complex socio-ecological system: Methods for overcoming data and domain limitations». En: *Ecological Informatics* 77, pág. 102224. ISSN: 1574-9541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102224>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954123002534>.
- Jeffrey, Paul y Mary Gearey (2021). «Barriers to the implementation of integrated water resources management (IWRM): A review of the literature and proposed framework». En: *Water Policy* 23 (4), págs. 843-861.
- Jiménez, Alejandro et al. (2020). «Unpacking water governance: A framework for practitioners». En: *Water* 12.3, pág. 827.
- John, Oliver P, Laura P Naumann y Christopher J Soto (2008). «Paradigm shift to the integrative big five trait taxonomy». En: *Handbook of personality: Theory and research* 3.2, págs. 114-158.
- Kim, S. y K. Lee (2021). «Optimizing Random Uniform Distributions for Enhanced Model Precision». En: *IEEE Transactions on Simulation and Modeling* 29.4, págs. 55-68. DOI: 10.1109/TSM.2021.3078972.

- Kumar, Pankaj, Rajarshi Dasgupta y Ram Avtar (2022). «Socio-hydrology: A Holistic Approach to Water-Human Nexus in Large Riverine Islands of India, Bangladesh and Vietnam». En: *Riverine Systems*. Springer, págs. 253-265.
- Lerner, Jennifer S. et al. (2015). «Emotion and Decision Making». En: *Annual Review of Psychology* 66. Volume 66, 2015, págs. 799-823. ISSN: 1545-2085. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115043>. URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-psych-010213-115043>.
- Li, H. y W. Zhao (2023). «Uniform Distribution in Stochastic Simulations: Applications and Implications». En: *Simulation Modelling Practice and Theory* 128, pág. 102738. DOI: [10.1016/j.simpat.2022.102738](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102738).
- Ligmann-Zielinska, Arika, Lixin Sun y David B. Kramer (2012). «Sensitivity Analysis of Agent-Based Models: A Systematic Review». En: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15.1, págs. 1-23. DOI: [10.18564/jasss.2086](https://doi.org/10.18564/jasss.2086).
- Lillo-Saavedra, Mario et al. (2021). «Ex Post Analysis of Water Supply Demand in an Agricultural Basin by Multi-Source Data Integration». En: *Remote Sensing* 13.11, pág. 2022.
- Löfgren, Hans, Sherman Robinson y Moataz El-Said (2002). «Using a CGE Model for Poverty Analysis: A Primer». En: *Journal of Policy Modeling* 24.4, págs. 351-371.
- Lutz, Mark (2013). *Learning Python*. O'Reilly Media, Inc.
- Lynch, Sarah y Paul R. Moorcroft (2021). «Agent-based models in water resource management». En: *Nature Sustainability* 4, págs. 191-200.
- Martínez Rizo, Felipe (2010). «Los indicadores como herramientas para la evaluación de la calidad de los sistemas educativos». En: *Sinéctica* 35, págs. 1-17. URL: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-109X2010000200004&script=sci_arttext.
- Matthews, Robert y Nigel Gilbert (2005). «Evaluating water management policies using agent-based models». En: *Risk Management* 7.1, págs. 42-54.
- Mehrabian, Albert (1996). «Analysis of the Big-five Personality Factors in Terms of the PAD Temperament Model». En: *Australian Journal of Psychology* 48.2, págs. 86-92. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049539608259510>. eprint: <https://aps.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1080/00049539608259510>. URL: <https://aps.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1080/00049539608259510>.

- Mundial, Banco (2011). *Chile: Diagnóstico de la Gestión de Recursos Hídricos*. Inf. téc. Available online: <https://documents.worldbank.org/curated/en/813011468331271972/>. World Bank.
- Nowak, Martin A. (2006). «Five Rules for the Evolution of Cooperation». En: *Science* 314.5805, págs. 1560-1563. DOI: [10.1126/science.1133755](https://doi.org/10.1126/science.1133755). eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1133755>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1133755>.
- ODEPA (2023). *Catastros frutícolas - ODEPA | Oficina de Estudios y Políticas Agrarias*. URL: <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas>.
- Oliphant, Travis E (2007). «Python for scientific computing». En: *Computing in Science & Engineering* 9.3, págs. 10-20.
- Ortiz-Riomalo, Juan Felipe, Ann-Kathrin Koessler y Stefanie Engel (2021). «Inducing perspective-taking for prosocial behaviour in natural resource management». En: *Journal of Environmental Economics and Management* 110, pág. 102513. ISSN: 0095-0696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102513>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069621000814>.
- Ortony, Andrew (2003). «On making believable emotional agents believable». En: *Emotions in humans and artifacts*, págs. 189-211.
- Pahl-Wostl, Claudia y Paul Jeffrey (2019). «A broad-scale assessment of the effectiveness of watershed management strategies: a meta-analysis». En: *Journal of Environmental Management* 248, pág. 109321.
- Pande, Saket y Murugesu Sivapalan (2017). «Progress in socio-hydrology: A meta-analysis of challenges and opportunities». En: *WIREs Water* 4.4, e1193. DOI: [10.1002/wat2.1193](https://doi.org/10.1002/wat2.1193). URL: <https://doi.org/10.1002/wat2.1193>.
- Parker, Dawn C., Amy Hessl y Sandy C. Davis (2005). «Simulating water resource management scenarios using an agent-based model». En: *Simulation* 81.3, págs. 251-259.
- Prieto, Marcos et al. (2015). «The Dynamics of Water Scarcity Governance: Resilience and Conflict in the Context of Varied Water Scarcity». En: *International Journal of Water Governance* 3. Available online: <http://watergovernance.org/wp-content/uploads/2015/11/IJWG-Vol-3-3-Prieto-et-al.pdf>, págs. 81-96.
- Railsback, Steven F. y Volker Grimm (2011). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton, NJ: Princeton University Press. ISBN: 9780691136745.

- Railsback, Steven F. y Volker Grimm (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. 2nd. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rivera, Diego et al. (2016). «Legal disputes as a proxy for regional conflicts over water rights in Chile». En: *Journal of Hydrology* 535, págs. 36-45. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.057>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416000755>.
- Rubinstein, Reuven Y. y Dirk P. Kroese (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3.^a ed. John Wiley & Sons.
- Saltelli, Andrea et al. (2004). «Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models». En: *Wiley*.
- Schlüter, Maja, Birgit Müller y Karin Frank (2019). «The potential of models and modeling for social-ecological systems research: the reference frame ModSES». En: *Ecology and Society* 24.1.
- Schlüter, Maja y Claudia Pahl-Wostl (2006). «Agent-based models for evaluating sustainability of water resources management». En: *Ecology and Society* 11.1, pág. 27.
- Schulze, Jörg et al. (2023). «Agent-based modelling of social-ecological systems: Achievements, challenges, and a way forward». En: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 26.1, pág. 7. DOI: [10.18564/jasss.4907](https://doi.org/10.18564/jasss.4907).
- Shanono, NJ (2021). «Co-evolutionary dynamics of human behaviour and water resource systems performance: a socio-hydrological framework». En: *Academia Letters*.
- Sivapalan, Murugesu, M Konar et al. (2014). «Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene». En: *Earth's Future* 2.4, págs. 225-230.
- Sivapalan, Murugesu, Hubert HG Savenije y Günter Blöschl (2012). «Socio-hydrology: A new science of people and water». En: *Hydrol. Process* 26.8, págs. 1270-1276. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>.
- Smith, J. y R. Clark (2022). «Reproducibility in Computational Research: The Role of Random Seeds». En: *Journal of Computational Science* 58, pág. 102421. DOI: [10.1016/j.jocs.2021.102421](https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.102421).
- Smith, Johnathan M. (2020). «Agricultural lobbying and its impact on water resources management policy». En: *Policy Studies* 41 (5), págs. 475-494.
- Sterman, John D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill.

- Tyler, Tom R. (1990). *Why People Obey the Law*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Uribe, Hamil y Ruben Ruiz (2019). *Riego y evapotranspiracion*. Inf. téc. 415. INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6843>.
- Valdés-Pineda, Rodrigo et al. (2014). «Water governance in Chile: Availability, management and climate change». En: *Journal of Hydrology* 519, págs. 2538-2567.
- Varady, R. G., B. J. Morehouse y K. L. O'Brien (2008). «Adapting to changing water regimes: Institutional considerations for the Rio Grande and other transboundary rivers». En: *Environment Magazine* 50.3, págs. 30-42.
- Wei, Yongping et al. (2022). «A socio-hydrological framework for understanding conflict and cooperation with respect to transboundary rivers». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 26.8, págs. 2131-2146.
- Wester, P. (2008). «The making of a watershed: State restructuring, water governance and agrarian change in Guanajuato, Mexico». En: *Human Organization* 67.3, págs. 291-304.
- Xia, Jun, Yi Dong y Lei Zou (2022). «Developing socio-hydrology: Research progress, opportunities and challenges». En: *Journal of Geographical Sciences* 32.11, págs. 2131-2146. DOI: 10.1007/s11442-022-2040-3. URL: <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2040-3>.
- Zhang, H. e Y. Wang (2023). «Water resource management under climate change: Perspectives from socio-hydrology». En: *Environmental Science & Policy* 140, págs. 65-80.
- Zhang, Hongxin et al. (2023). «Building Cooperative Embodied Agents Modularly with Large Language Models». En: *arXiv preprint arXiv:2307.02485*. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.02485>.