

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO HUMANO FRENTE A
INUNDACIONES FLUVIALES RECURRENTES.
CASO DE ESTUDIO DEL RÍO CARAMPANGUE**

VICENTE SAENGER D.¹
JORGE HURTADO P.²
CATALINA MENDOZA L.³
ROCÍO COLOMA F.⁴
ALEJANDRA STEHR G.⁵
OSCAR LINK L.⁶

RESUMEN

Se desarrollo un Modelo Basado en Agentes para estudiar la dinámica histórica de la interacción entre hogares e inundaciones en la parte baja del Río Carampangue, entre los años 1985 y 2024. Se utilizaron dos fuentes principales de información: (1) dos encuestas realizadas los años 2017 y 2024 y (2) simulaciones hidráulicas de caudales máximos anuales. Se definieron reglas que emulan cuatro tipos de comportamientos de largo plazo conocidos, y se simularon cuatro escenarios, en cada uno adoptando todos los hogares un mismo tipo de comportamiento. Se generaron simulaciones históricas que muestran los hogares que implementaron medidas y los inundados. Los resultados reflejan que los comportamientos que predominan en el caso de estudio son los de tipo Proactivo y Efecto Aprendizaje.

¹ Estudiante de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción - email: vsaenger2017@udec.cl

² Académico, Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiam - email: jorge.hurtado@ikiam.edu.ec

³ Profesional Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: catalina.mele@gmail.com

⁴ Estudiante de Magister, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: rcoloma2019@udec.cl

⁵ Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: astehr@udec.cl

⁶ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: olink@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el crecimiento de la población están aumentando el riesgo por inundaciones a nivel global (Blöschl, 2022). Soluciones tradicionales de ingeniería no consideran la interacción del sistema social con las inundaciones, lo que genera efectos contraintuitivos y adversos. Por ejemplo, el desarrollo urbano en zonas protegidas por obras hidráulicas aumenta el riesgo debido a la sensación de seguridad y falta de experiencias recientes con inundaciones, lo que se conoce como “efecto dique” (Di Baldassarre, 2017). Por los motivos expuestos, analizar la interacción entre personas e inundaciones es clave para evaluar escenarios futuros y reducir de forma efectiva el riesgo.

La sociohidrología es una interdisciplina que analiza la interacción entre el sistema social y el agua (Sivapalan et al. 2012). Específicamente, la interacción entre las personas y las inundaciones fluviales ha sido estudiada desde diversas perspectivas. En el largo plazo, se conocen cuatro tipos de comportamientos (Leong, 2018).

Tanto el comportamiento del tipo (Q1) olvido o efecto dique como el comportamiento tipo (Q4) efecto aprendizaje han sido bien estudiados y abordados. Los tipos de comportamiento (Q2) proactivo y (Q3) *status-quo* han sido poco abordados en la literatura. A continuación, se describen las principales características de los comportamientos mencionados.

- (Q1) Olvido o efecto dique: Interacción que se da cuando los humanos dejan de estar expuestos frecuentemente a inundaciones, dejando de percibir el peligro, llevando a emplazarse en zonas expuestas sin medidas o a dejar de tomar medidas ante inundaciones. Se puede producir tanto por obras hidráulicas como diques o represas, así como por fenómenos naturales como sequías. Se conocen múltiples casos (Di Baldassarre et al. 2019), y se produce sobre todo en países desarrollados.
- (Q2) Proactivo: Ocurre cuando a pesar de que los humanos no se encuentran frecuentemente expuestos a inundaciones, aun así, toman medidas preventivas adaptativas ante las inundaciones. Se conocen casos en Polonia y en Noruega (Leong, 2018).
- (Q3) *Status-quo*: Humanos se ven frecuentemente afectados por inundaciones, pero a pesar de esto no toman medidas para disminuir el daño percibido por ellas. En San Pedro de Atacama, Chile, la investigadora Leal y otros (2024) reportaron este tipo de comportamiento.
- (Q4) Efecto Aprendizaje: Humanos se ven frecuentemente afectados por inundaciones, y adoptan medidas que les permiten disminuir sus consecuencias ante estos eventos. Se reportan en la literatura múltiples casos de este tipo de comportamiento. Constanza Veloso y otros (2022) reportaron que este comportamiento se producía en la llanura de inundación del río Carampangue.

La interacción a largo plazo entre las personas y las inundaciones ha sido abordada mediante tres métodos (Di Baldassarre et al. 2015): (1) encuestas y entrevistas, (2) conjunto de

ecuaciones diferenciales y (3) modelación basada en agentes (MBA). Las dos primeras aproximaciones presentan desventajas en términos de la escala y generalidad de resultados. Por otro lado, la MBA permite simular el comportamiento individual y la interacción entre agentes en un entorno para estudiar fenómenos complejos. En este contexto, se propone usar un Modelo Basado en Agentes para simular el comportamiento de los hogares frente a las inundaciones evitando desventajas en términos de la escala y generalidad de resultados.

La interacción entre el sistema social y las inundaciones ya ha sido explorada mediante MBA (Abebe et al. 2020). Sin embargo, los trabajos precedentes se basan en supuestos y simplificaciones, generando resultados teóricos poco aplicables para la gestión del riesgo.

En esta investigación se analizó la evolución del comportamiento humano ante inundaciones en el tiempo, integrando la modelación hidráulica con información obtenida mediante encuestas en un modelo basado en agentes aplicado en la planicie de inundación del río Carampangue, región del Biobío, Chile.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CASO DE ESTUDIO

El modelo basado en agentes se aplicó en un área situada en la parte baja de la cuenca del río Carampangue, en Arauco, Chile (Figura 2.1).

La cuenca del río Carampangue es una cuenca costera de régimen pluvial y se ubica en Chile Central, drenando un área de 1262 km². El río Carampangue es considerado un río no regulado o cuasi prístino, ya que no cuenta en su curso con grandes obras de infraestructura ni intervenciones en su cuenca (Veloso et al. 2022).

En la parte baja de la cuenca, cercanas al río Carampangue y a su principal tributario el río Lía, se localizan Arauco, Carampangue y Ramadillas. Estas localidades pertenecen a la comuna de Arauco, que cuenta con un total de 37.163 habitantes (Censo, 2024)

Arauco, Carampangue, Ramadillas y sus alrededores se ven frecuentemente afectadas por inundaciones de bajo periodo de retorno. Rojas et al. (2010), reporta que inundaciones afectan la zona con una periodicidad aproximada de 2,23 años.

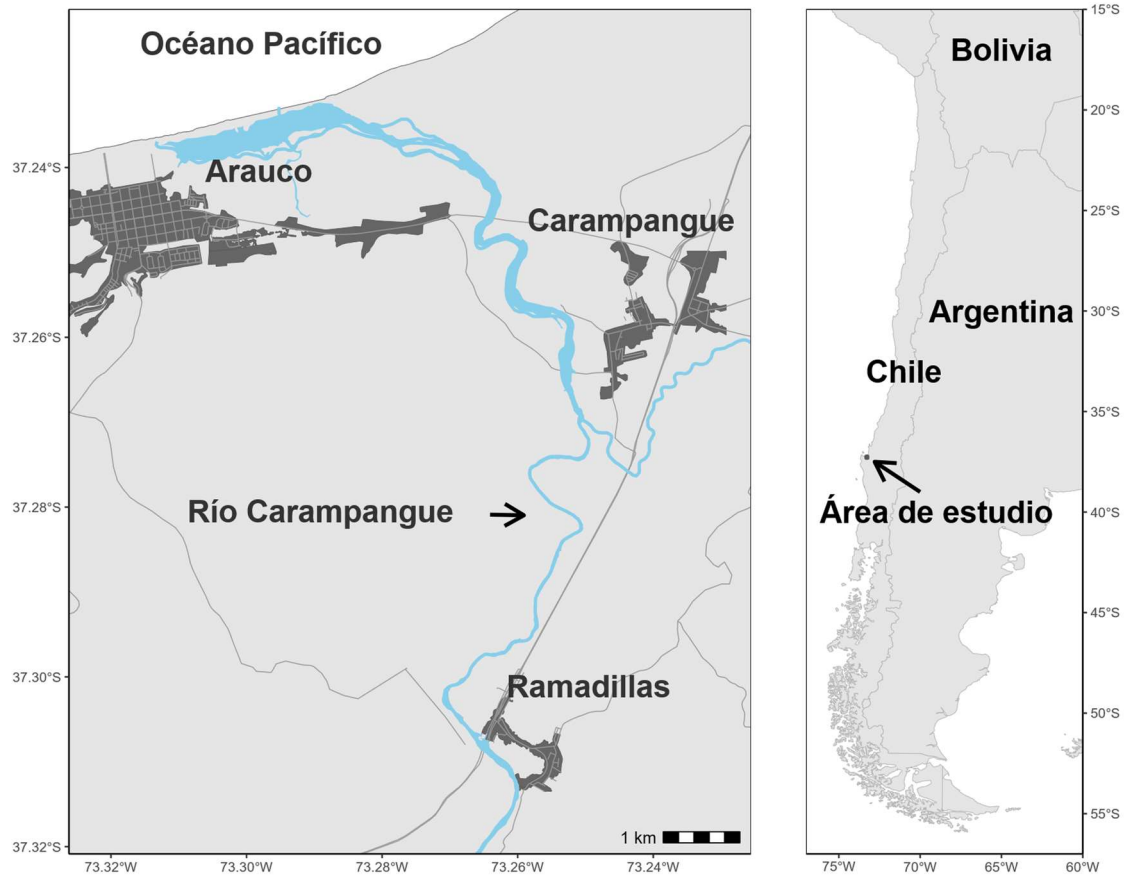


Figura 2.1 Área caso de estudio: parte baja cuenca del río Carampangue, Arauco, Chile.

2.2 MODELO BASADO EN AGENTES

El Modelo Basado en Agentes para el Análisis del Riesgo de Inundación (MBA-ARI) se construyó en base a tres componentes: (1) Información de Encuestas y (2) Simulaciones históricas de inundaciones y (3) Reglas de comportamiento a nivel de hogares.

El modelo es computacional y matemático, los agentes son hogares y representan el componente social mientras que el componente físico está representado por las inundaciones. El modelo es espacialmente explícito para la localización de los hogares, elevación y profundidad del agua producto de las inundaciones.

El modelo basado en agentes se desarrolló para reconstruir la dinámica del pasado. Las simulaciones se efectuaron con un paso de tiempo anual, por un periodo de 40 años entre 1985 y 2024. El modelo fue implementado en el *software* R versión 4.4.3.

2.2.1 ENCUESTAS

Dos encuestas han sido realizadas en el área del caso de estudio: la primera el año 2017 y la segunda el año 2024. La aplicación de ambas encuestas fue presencial asistidas por papel (PAPI), y posteriormente fueron digitalizadas.

Se recopilaron 223 y 275 encuestas válidas en los años 2017 y 2024, respectivamente, contabilizando un total de 498 encuestas en área del caso de estudio.

Del total de hogares encuestados, 39 hogares fueron encuestados en ambas ocasiones. De este grupo, se descartaron del análisis aquellos hogares cuyos núcleos familiares se incorporaron al sector después de la aplicación de la encuesta del 2017. Se descartaron también los hogares que se encontraban fuera del dominio hidráulico.

Para el desarrollo del MBA-ARI se utilizó: (1) el año de llegada al hogar, informado en la encuesta del año 2024, y (2) la localización de los hogares. Se utilizó la información de un total de 411 hogares.

Para los hogares encuestados el año 2017, y que no fueron encuestados el año 2024, el año de llegada al hogar se asignó de forma aleatoria según su localización y según las áreas urbanas de los mapas de uso de suelo de los años 1997, 2008, y 2015 del área de estudio (CONAF). Es decir, en caso de que un hogar este localizado en una zona urbanizada el año 2008, y que esta zona no se encontraba urbanizada el año 1997, el año de llegada del hogar a la zona se asigna aleatoriamente entre los años 1997 y 2008. Para los hogares que se encuentran fuera de la zona urbana se asignó un año aleatorio dentro del periodo en análisis.

El análisis de las encuestas se centró en la toma de medidas y en la afectación producto de las inundaciones. En la Tabla 2.1 se muestran el tipo de medidas consideradas en el modelo, para las encuestas del 2017 y la del 2024.

Tabla 2.1 Tipo de medidas consideradas en el MBA-ARI.

Medidas: Encuesta 2017	Medidas: Encuesta 2024
Construcción en alto, relleno	Construir sobre pilotes
Sacos de arena	Elevar el nivel de losa del piso
Diques	Relleno de suelo
Defensas	Construcción de muro
	Instalación de barrera de neumáticos
	Instalación de barrera de sacos de arena

Se consideraron solo el tipo de medidas que podrían impedir eventualmente el ingreso del agua a un hogar producto de una inundación fluvial.

2.2.2 HIDROLOGÍA – HIDRÁULICA

Los datos de caudal máximo anual se obtuvieron de los registros de la estación Río Carampangue en Carampangue, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA). Los años sin datos se rellenaron a través del método de transposición, utilizando información de las estaciones Río Nicodahue en Pichún, Río Caramávida en Caramávida, y Río Curanilahue en Curanilahue.

Para disminuir el costo computacional, se optó por no simular individualmente cada evento del período de análisis. En su lugar, se simularon eventos asociados a diferentes períodos de retorno, cercanos a los periodos de retorno del periodo en análisis, asignando a cada año el período de retorno más cercano en función del caudal máximo anual.

Los periodos de retorno, la duración y la forma de un hidrograma típico de crecida del río Carampangue se obtuvieron del trabajo realizado por Alarcón et al. 2024. Los hidrogramas fueron construidos para cada caudal máximo de los eventos representativos. Estos hidrogramas se utilizaron como insumo en la modelación hidráulica.

Las crecidas fueron simuladas numéricamente en el módulo hidrodinámico de IBER, a partir del modelo desarrollado por Alarcón et al. (2024). El dominio del modelo fue discretizado mediante una malla no estructurada compuesta por 1144103 volúmenes finitos triangulares con resoluciones variables.

El modelo de elevación digital (DEM) de la zona fue construido utilizando múltiples fuentes de información. Los cauces y sus planicies fueron caracterizados por dos topobatimetrías efectuadas. La desembocadura se obtuvo con un vuelo LiDAR de píxeles de 2.5 metros de resolución. En las zonas urbanas se utilizó un DEM con resolución de 5 metros.

El número de Manning fue asignado según el uso de suelo, y se utilizó el conjunto de valores calibrados con la profundidad del cauce, reportados por Alarcón et al. (2024).

2.2.3 REGLAS DE COMPORTAMIENTO

Basados en su experiencia con inundaciones, los hogares pueden decidir implementar una medida, dejar de implementarla o no adoptar ninguna medida

En el MBA-ARI se plantean cuatro tipos de comportamientos, emulando los comportamientos planteados por Leong.

La disposición a tomar medidas se representa por la voluntad de cumplimiento (vc), y esta puede cambiar según dos mecanismos que dependen del tipo de comportamiento, pudiendo aumentar (aprendizaje) o disminuir (olvido).

En el caso de un hogar i que se inunda en el año t :

- Para los comportamientos Q1, Q2 y Q4 la voluntad de cumplimiento para un hogar i en el año t se actualiza según las ecuaciones (1) y (2), en donde el aumento en la voluntad de cumplimiento es la máxima altura del agua en el hogar en el año t .

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} + \Delta vc_{i,t} \quad (1)$$

$$\Delta vc_{i,t} = h_{i,t} \quad (2)$$

- Para el comportamiento Q3 no hay cambios en la voluntad de cumplimiento (ecuación (3)):

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} \quad (3)$$

En el caso de un hogar i que no se inunda en el año t :

- Para el comportamiento Q1, se produce una disminución de la voluntad de cumplimiento en el año t , que viene dada según las ecuaciones (4) y (5). La voluntad disminuye a razón de 1/7 de la voluntad de cumplimiento del año anterior.

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} - \Delta vc_{i,t} \quad (4)$$

$$\Delta vc_{i,t} = \frac{vc_{i,t-1}}{7} \quad (5)$$

- Por el contrario, a esta misma razón crece la voluntad de cumplimiento del comportamiento Q2 (ecuación (6))

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} + \Delta vc_{i,t} \quad (6)$$

$$\Delta vc_{i,t} = \frac{vc_{i,t-1}}{7} \quad (7)$$

- Para los comportamientos Q3 y Q4 no hay cambios en la voluntad de cumplimiento (ecuación (8)).

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} \quad (8)$$

Una vez que la voluntad de cumplimiento traspasa el umbral, el hogar toma la medida en el año $t + 1$. El aumento de la elevación del hogar es en función de la máxima profundidad del agua percibida por el hogar.

$$medida_{i,t+1} = \begin{cases} si, & vc_{i,t} > vc_{cr} \\ no, & vc_{i,t} \leq vc_{cr} \end{cases} \quad (9)$$

Esta medida es implementada solo si la voluntad de cumplimiento es mayor que el umbral vc_{cr} . En caso contrario, la medida deja de ser implementada.

La magnitud de la medida tomada es en función de la máxima altura del agua experimentada en el hogar i hasta el año t , multiplicada por un factor f , y se manifiesta en un incremento de la elevación del hogar $z_{i,t}$.

$$z_{i,t+1} = z_{i,t} + f * \max(h_i) \quad (10)$$

Se simularon 4 escenarios donde todos los hogares tienen un mismo tipo de comportamiento (Q1, Q2, Q3 y Q4; Leong 2018).

Para cada hogar, se adoptó como condición inicial $vc_i = 0$ al incorporarse al modelo, y se definió un valor crítico $vc_{cr} = 1 m$. Se definió $f = 1.5$.

3. RESULTADOS

En la Figura 3.1 se muestra el número de hogares en el periodo en estudio.

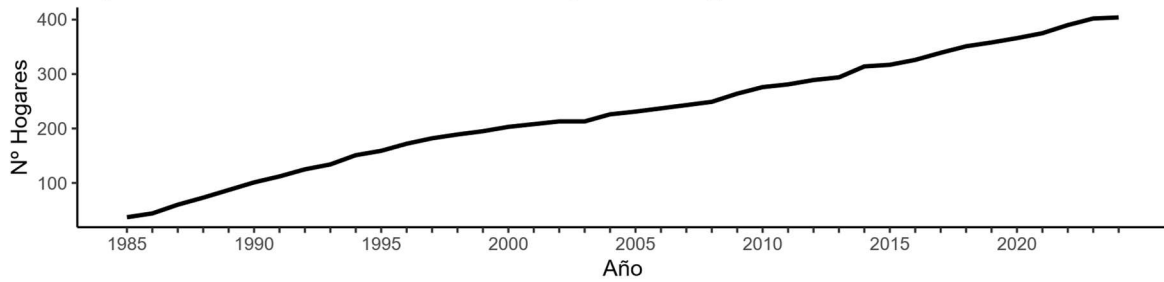


Figura 3.1 Número de hogares en el tiempo.

La Tabla 3.1, se muestra el porcentaje de hogares que reportan la implementación de al menos una de las medidas de la Tabla 2.1. Además, se muestra el porcentaje de hogares inundados en el año 2024.

Tabla 3.1 Valores porcentuales de hogares que implementan medidas y hogares inundados.

Variable	2017	2024
% Hogares que toman medidas	22.8	24.2
% Hogares inundados	-	23.3

Los caudales y el respectivo periodo de retorno de los escenarios simulados se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Caudales y Periodos de Retorno simulados.

Caudal (m ³ /s)	Periodo de Retorno (Años)
341.8	<2
487.0	2
609.7	5
690.3	10
789.6	25

En la Figura 3.2 se muestran el periodo de retorno con el que se representa el caudal máximo anual para cada año en el periodo en análisis.

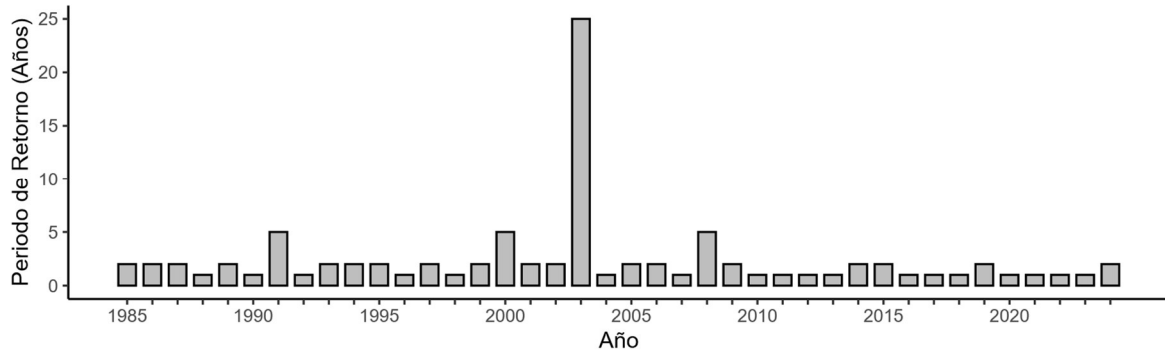


Figura 3.2 Serie de periodos de retorno asignados a caudal máximo anual.

La Figura 3.3 muestra la extensión de la inundación para las diferentes magnitudes simuladas.

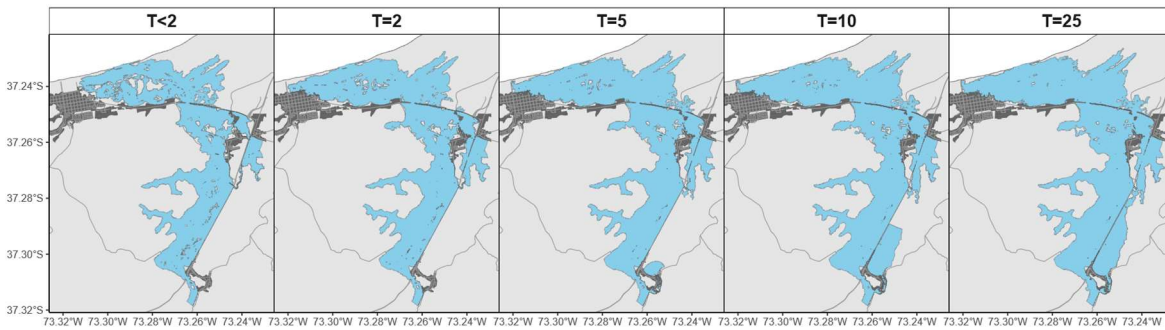


Figura 3.3 Extensión de zonas inundadas en periodos de retorno simulados.

La Figura 3.4 muestra el porcentaje de hogares que toman medidas en el tiempo, para cada simulación del MBA. Los puntos negros corresponden a los datos de la Tabla 3.1.

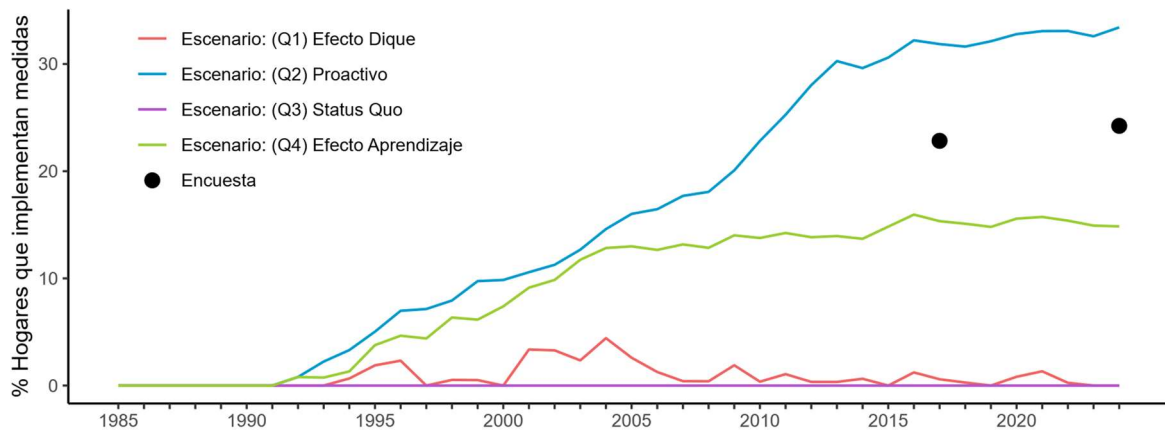


Figura 3.4 Porcentaje hogares que implementan medidas en el tiempo.

La Figura 3.5, muestra el porcentaje de hogares inundados por año en los escenarios simulados en el MBA-ARI. Los puntos negros corresponden al dato de la Tabla 3.1.

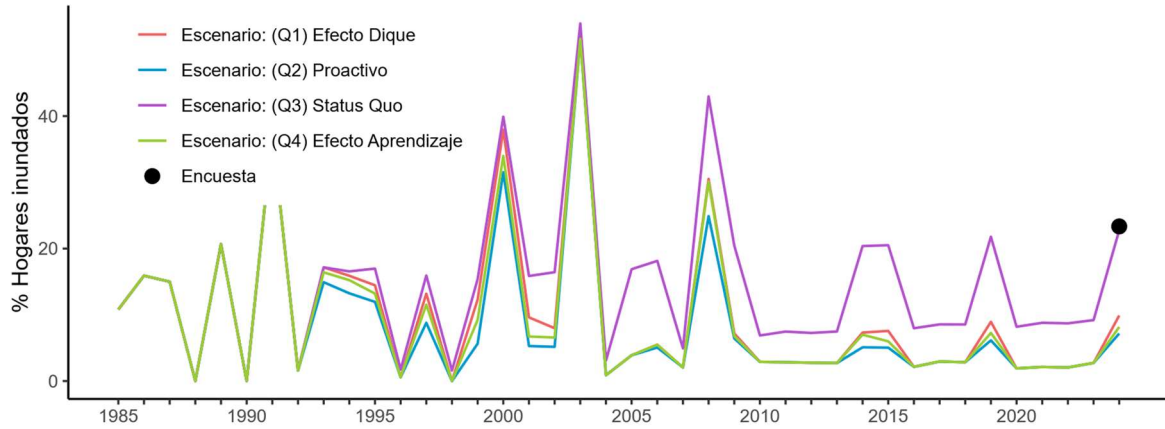


Figura 3.5 Porcentaje hogares inundados en el tiempo.

4. DISCUSIÓN

En la Figura 3.1 se visualiza un aumento de los hogares constante en el tiempo. Entre 2017 y 2024 la implementación de medidas un aumenta en 2.4% (Tabla 3.1). El porcentaje de hogares inundados el año 2024 es menor al porcentaje de hogares que implementan medidas en el mismo año.

La Figura 3.2 muestra que para el periodo en análisis el caudal máximo anual es menor o igual a 5 años, exceptuando el año 2003, donde ocurrió un caudal máximo anual con periodo de retorno de 25 años.

En la Figura 3.3 se observa que, en general, la extensión de las inundaciones no cambia de forma importante al aumentar la magnitud de la inundación. Pero, en zonas urbanas si se observan cambios relevantes en la extensión al aumentar en la magnitud, sobre todo en las localidades de Ramadillas y Carampangue.

De la Figura 3.4, en el escenario Q2 se observa el mayor incremento en la implementación de medidas, reflejando un comportamiento del tipo proactivo. En el escenario Q4 se observa una tendencia similar, pero en menor medida. En el escenario Q1 se muestra un leve incremento hasta un peak el año 2004, un año después de la crecida de T=25 años, luego el porcentaje tiende a declinar, reflejando el mecanismo olvido del comportamiento. El porcentaje de implementación de las medidas en el escenario Q3 se mantiene en cero.

En la Figura 3.5, los hogares inundados en los escenarios Q1, Q2, y Q4 son similares, produciéndose leves diferencias en los años con crecidas de periodo de retorno igual o mayor a 2 años. Durante este periodo, en el escenario Q3 los hogares inundados se mantienen considerablemente por encima de los demás escenarios.

De la Figura 3.4, se observa que los puntos obtenidos en las encuestas 2017 y 2024 se encuentran entre los escenarios Q2 y Q4, lo que sugiere que posiblemente el comportamiento sea mixto en la zona, y que los comportamientos predominantes sean del tipo Proactivo y del

tipo Efecto Aprendizaje. Esto concuerda parcialmente con lo afirmado por Veloso et al. (2021).

Por otra parte, de la Figura 3.5, el punto obtenido a través de la encuesta esta por sobre el escenario Q3, el escenario más desfavorable. Esto podría explicarse por limitaciones en la efectividad de las soluciones implementadas, o por una subestimación por parte del modelo hidráulico y/o de los caudales de entrada provenientes del análisis hidrológico.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los valores observados en las encuestas se alinean con los resultados modelados: (1) con los escenarios Q2 y Q4 en el caso de la implementación de medidas, y (2) con el escenario Q3 en el caso de los hogares afectados por inundaciones. Este contraste destaca el desafío futuro de desarrollar una modelación que logre un ajuste adecuado en ambas variables de manera simultánea.

El MBA-ARI permitió representar los comportamientos propuestos por Leong (2018), lo que permitiría incorporar heterogeneidad de comportamiento en los hogares. Además, permitiría analizar la evolución del comportamiento en el tiempo y evaluar escenarios futuros, incluyendo posibles modificaciones en el sistema hídrico, como la construcción de diques o represas.

A futuro, se espera calibrar el MBA-ARI en detalle utilizando información hidrológica e hidráulica más precisa, y ajustar los parámetros de comportamiento para representar con mayor exactitud la dinámica histórica. Esto permitirá fortalecer la capacidad predictiva del modelo, confiar en sus predicciones y proyectar a futuro.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es financiada por los siguientes fondos: ANID BECAS/DOCTORADO NACIONAL 21252243; ANID/ANILLOS DE INVESTIGACIÓN/ATE220021. Los autores agradecen a los revisores por sus valiosos comentarios sobre la primera versión de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abebe, Y. A., Ghorbani, A., Nikolic, I., Manojlovic, N., Gruhn, A., y Vojinovic, Z. 2020. The role of household adaptation measures in reducing vulnerability to flooding: a coupled agent-based and flood modelling approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11):5329–5354. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5329-2020>
- Alarcón, B., Saenger, V., Guerra, M., Faúndez, R., Link, F., Carrasco, J. A., y Link, O. 2024. Using social cartographies for the calibration of two-dimensional hydraulic flood models. *Natural Hazards*,. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06838-0>

Di Baldassarre, G. 2015. Debates-perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. *Water Resources Research*, 51(6):4770–4781, 2015 <https://doi.org/10.1002/2014WR016416>

Di Baldassarre et al. 2019. Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. *Water Resources Research*, 55(8):6327–6355, <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>

Bladé, E., et al., 2014. Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30 (1), 1-10.

Instituto Chileno de Estadísticas (INE), 2025. Censo de Población y Vivienda 2024 [en línea]. Disponible en: <https://censo2024.ine.gob.cl/>

Leong, C. 2018. The role of narratives in sociohydrological models of flood behaviors. *Water Resources Research*, 54(4):3100–312. <https://doi.org/10.1002/2017WR022036>

Mendoza Leal, C., Coloma, R., Ponce, D., Alarcón, B., Guerra, M., Stehr, A., Carrasco, J.A., Alcayaga, H., Rojas, O., Link, F., y Link, O. 2024. The status quo effect in the sociohydrology of floods. *Hydrological Sciences Journal*, 69(16):2423–2435. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2412734>

Rojas, O., Martínez, C., y Jaque, E., 2010. Recurrencia histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, región del Bío-Bío. *Tiempo y espacio*, 25, 117-135.

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., y Blöschl, G., 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8):1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>

Veloso, C., et al. 2022. Preparedness against floods in nearly pristine socio-hydrological systems. *Hydrological Sciences Journal*, 67:3, 319-327. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2023156>