

# Desarrollo de un modelo dinámico para planificar una adaptación preventiva, ante una amenaza de tsunami en la localidad de Mehuín (Chile)

## Development of a dynamic model for planning a preventive adaptation to a tsunami threat in the town of Mehuin (Chile)

Rosas-Neira<sup>1</sup>, Jonathan ; Mazzorana<sup>2</sup>, Bruno ; Villagra, Paula<sup>3,4,5</sup> 

### RESUMEN

El territorio chileno se ha visto afectado por diversas amenazas naturales, las cuales han sido potenciadas por las formas de ocupación y uso del suelo, trayendo diversas consecuencias en la estructura territorial. En esta investigación, se desarrolló un modelo que permite visualizar el comportamiento del sistema Mehuín (Región de Los Ríos, Chile) y priorizar las variables físicas, sociales y ambientales que inciden en la resiliencia comunitaria frente a un tsunami. Los resultados muestran que el aumento de los simulacros de tsunamis, del área no construida y de instalaciones comunitarias, más la protección de las dunas costeras y de las áreas de inundación natural constituyen medidas preventivas para que el sistema enfrente de manera resiliente un posible tsunami. Este modelo se proyecta como una herramienta replicable de adaptación preventiva para los sistemas territoriales frente a las diversas amenazas a que se ven expuestos, permitiendo hacer un uso eficiente de los recursos estatales y privados.

**Palabras claves:** tsunamis, adaptación preventiva, resiliencia, sistemas dinámicos.

### ABSTRACT

The Chilean territory has been affected by various natural hazards, which have been exacerbated by current land use practices resulting into serious consequences for the affected communities. In this research, a model was developed that allows visualizing the behavior of the Mehuin system (Los Rios Region, Chile) and identifying the variables that affect community resilience in the face of a tsunami. Results show that training in tsunami preparedness, an increment in unbuilt areas and community facilities, and the protection of coastal dunes and natural flood areas are the most beneficial alternatives for the Mehuin system to face a possible tsunami in a resilient way and it's therefore where the authorities should focus their interest and the available resources. This model is a replicable tool for preventive adaptation of territorial systems exposed to different natural hazards, allowing an efficient use of public and private resources.

**Keywords:** tsunamis, preventive adaptation, resilience, dynamic systems.

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. Correo: jonathan.rosas01@alumnos.uach.cl

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. Correo: bruno.mazzorana@uach.cl

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. Correo: paula.villagra@uach.cl

<sup>4</sup> Centro del Fuego y Resiliencia de Socioecosistemas (FireSES), Universidad Austral de Chile. Correo: paula.villagra@uach.cl

<sup>5</sup> Laboratorio de Paisaje y Resiliencia Urbana (PRULAB). Correo: paula.villagra@uach.cl

En base al trabajo de Walker et al. (2004) y Cutter et al. (2014), se concibe la resiliencia al desastre como la capacidad de un sistema (ej. territorial) para absorber las perturbaciones a las que se encuentra expuesto y tener la habilidad de reorganizarse y recuperarse incorporando los cambios necesarios para estar mejor preparado ante futuras amenazas, pero a la vez, conservando la misma función, estructura e identidad que lo caracteriza. Para aumentar la resiliencia al desastre a nivel comunitario, se destaca cada vez más la integración de la adaptación preventiva (Biagini et al., 2014). La adaptación es entendida, en el ámbito del cambio global, como un proceso, acción o resultado en un sistema (comunidad, región, país, etc.) que le permite enfrentar, gestionar o ajustarse a cambios de condición, estrés, riesgo u oportunidad (Smith & Wandel, 2006). En Chile, las medidas de adaptación han tenido evidencias de ser reactivas debido al manejo que las entidades y autoridades correspondientes le han dado al desastre, quedando de manifiesto con el terremoto y posterior tsunami en la ciudad de Concepción (Lagos et al., 2010); y con la erupción del volcán Chaitén y posterior desborde del río Blanco en el año 2008 (Basso et al., 2020; Lara, 2009). La finalidad de la adaptación preventiva es impulsar aquellas transformaciones comunitarias que fortalezcan las capacidades de anticipar los efectos a los impactos de los procesos de amenaza, y las capacidades de planificación de las respuestas asociadas, creando las condiciones para una comunidad resiliente a las perturbaciones naturales a que se encuentra expuesta (Mazzorana et al., 2018).

Para lograr la adaptación preventiva es de suma importancia identificar variables gatilladoras de procesos en el sistema que mejoren la resiliencia. Esto implica poseer un conocimiento íntegro de la dinámica del sistema que se estudia, debido a que otorga la oportunidad de simular los eventos perturbadores con y sin medidas (ej. prevención, mitigación, entre otros), ofreciendo a las autoridades la posibilidad de implementar un conjunto de medidas adaptativas eficaces. En base a esto, surge la necesidad de desarrollar un modelo dinámico que permita planificar una adaptación preventiva ante una amenaza de tsunami, otorgando la posibilidad de reconocer las variables que provocan mayores cambios en el sistema y contribuyan mayormente a la resiliencia comunitaria (Biagini et al., 2014; Villagra et al., 2017). Esta investigación tiene como finalidad dar respuesta a lo anteriormente expuesto por medio del desarrollo de un modelo de adaptación preventiva, a partir de variables ambientales, físicas y sociales que inciden en la resiliencia comunitaria frente a un tsunami en la localidad de Mehuín, Chile.

El resto del presente documento se estructura en seis secciones. La primera de las cuales presenta una sinopsis de los antecedentes teóricos esenciales para el desarrollo del modelo dinámico de adaptación preventiva. Luego, se describe el área de estudio que incluye a Mehuín, una localidad costera ubicada en la comuna de Mariquina, región de Los Ríos. A continuación, en el apartado materiales y métodos, se detalla la metodología empleada en cada una de las etapas de desarrollo del modelo dinámico. Posteriormente se presentan los resultados, es decir la estructura del modelo dinámico de adaptación preventiva, su parametrización completa y la exploración de escenarios dinámicos de sistema y de adaptación preventiva. Para finalizar, se discuten los resultados donde se reconocen las variables que presentan una mayor incidencia sobre la resiliencia comunitaria de Mehuín, presentando su estado actual dentro de los Instrumentos de Planificación Territorial y proyectando posibles vías de intervención que mejoren la capacidad de afrontamiento del sistema en estudio.

## Antecedentes

### *Lógica Difusa*

La lógica difusa fue concebida por Lofti Zadeh, un ingeniero eléctrico iraní y profesor de la Universidad de California, que en 1965 publicó el primer artículo sobre esta temática denominado "Fuzzy Sets" (Zadeh, 1965). Kouro & Musalem (2002), describen la lógica difusa como un sistema interpretativo, donde los elementos son relacionados con conjuntos de fronteras no claramente definidas, entregándoles un grado de membresía relativo a un valor numérico y no estricto como lo realiza la lógica tradicional. En otras palabras, la teoría de conjuntos difusos permite hacer decisiones en un entorno difuso, que se compone de objetivos difusos, restricciones y un espacio decisional difuso (Rommelfanger & Eickemeier, 2001; Mouton et al., 2009; Mazzorana & Fuchs, 2010).

Un conjunto difuso se define matemáticamente como:

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\} \quad (1)$$

Donde  $\mu_A: x \rightarrow [0,1]$  es la función de pertenencia,  $\mu_A(x)$  es el grado de membresía de la variable  $x$  al conjunto  $A$  y  $U$  es el dominio de aplicación o universo. La principal diferencia entre la lógica difusa y la lógica booleana, y que la hace adecuada para el procesamiento de problemas de alta incertidumbre, es la consideración de un nivel de incertidumbre en la cuantificación de cantidades. Por ejemplo, la pertenencia de un objeto a un conjunto booleano puede ser total o nula (1 o 0), mientras que en un conjunto difuso varía entre el valor 0 a 1 (Zadeh, 1968).

Un conjunto difuso también se puede representar gráficamente a través de una función de pertenencia, principalmente cuando su universo ( $U$ ) es continuo. Estas funciones de pertenencia se pueden graficar a través de una función triangular, función sigmoidea, función gamma, función gaussiana, función trapezoidal y función pseudo-exponencial (Revelo, 2006).

### *Mapas Cognitivos Difusos*

Robert Axelrod en 1976, con su publicación "Structure of Decision: The Cognitive Map of Political Elites", introdujo el concepto de mapas cognitivos como una manera formal de representar el conocimiento científico-social y modelar las decisiones en los sistemas sociales y políticos (Vergini & Groumpos, 2016). A partir de entonces estos se han aplicado en diversos campos de estudio como son la psicología, educación, planificación urbana, geografía, cartografía, entre otros (Gray et al., 2013).

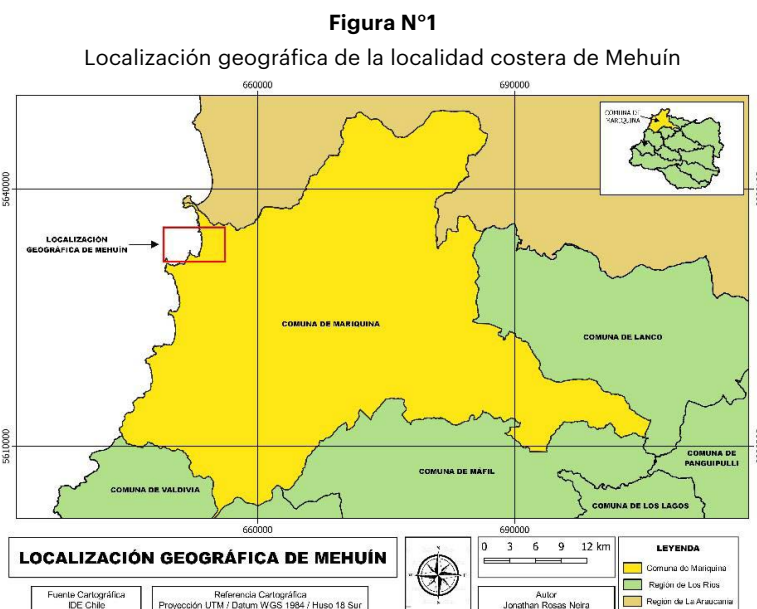
En 1986, Bart Kosko introdujo el concepto de Mapa Cognitivo Difuso (FCM, sigla en inglés) el cual es una metodología computacional y que viene siendo una extensión de los mapas cognitivos (Gray et al., 2014). Kosko (1993) menciona que un FCM presenta un dibujo causal donde se conectan hechos y procesos con valores, reglas y objetivos que permiten predecir cómo interactúan eventos complejos. Consiste en factores (conceptos / nodos) que representan los elementos importantes del sistema mapeado, y arcos dirigidos, que representan las relaciones causales entre los factores (Voinov & Bousquet, 2010). La conexión de dos variables es denominada peso,

y su valoración se encuentra en el intervalo  $[-1, 1]$  (Gray et al., 2014). Un peso positivo representa una relación causal positiva y un peso negativo representa una relación causal negativa (Carvalho, 2013). El grupo de expertos define las variables y conceptos involucrados, además de las conexiones entre los conceptos en base a reglas lingüísticas (Salmeron, 2009).

## Área de Estudio

Los tsunamis son eventos naturales hidrológicos extremos de rápida generación, responsables de numerosas pérdidas humanas y económicas en las localidades costeras (Lagos, 2000). En el caso de Chile, la constante amenaza se debe a la localización geográfica de la costa chilena a lo largo de una zona de subducción, en la cual convergen las placas de Nazca y Sudamericana (CSN, 2014). Desde el siglo XVI en adelante, en base a los registros históricos y la evidencia instrumental, se demuestra que han ocurrido más de cien tsunamis cerca de la costa chilena, de los cuales 35 han sido destructivos (Lagos & Gutiérrez, 2005).

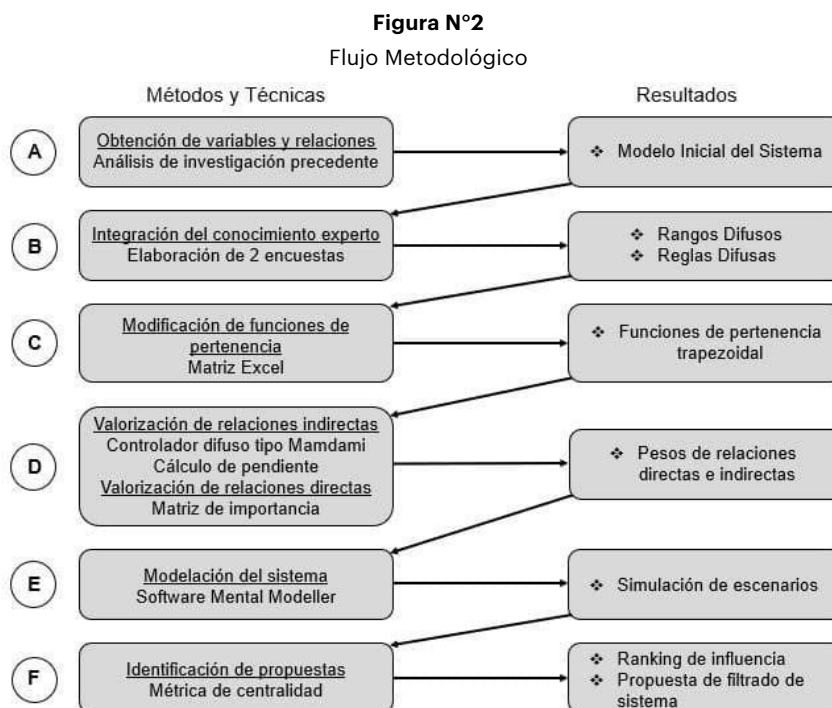
Mehuín ( $39^{\circ}26'34''S$ ,  $73^{\circ}12'46''O$ ) es una localidad costera ubicada en la comuna de Mariquina, región de Los Ríos, Chile, a una distancia de 935 km al suroeste de la capital Santiago (Figura N°1). Se encuentra en la desembocadura del río Lingue, bahía de Maiquillahue, en una estrecha llanura costera junto a la Cordillera de la Costa (Villagra et al., 2016). Se asienta en tierras bajas que varían entre 5 a 20 metros sobre el nivel del mar. Según datos del Censo 2017, esta zona cuenta con una población aproximada de 1.384 personas distribuidas en 1.022 viviendas. La Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) del año 2018, ubica a la comuna de Mariquina sobre la línea de pobreza por ingresos y multidimensional del año 2015 a nivel regional. Debido a esto, Mehuín es considerada una comunidad pobre y marginada donde cerca del 80% de su población basa su economía en la pesca y la recolección de orilla (Villagra et al., 2016).



Fuente: Elaboración propia.

## Materiales y Métodos

En esta sección se aborda el flujo metodológico utilizado en la investigación, detallando cada uno de los pasos realizados en el desarrollo de la estructura del modelo adaptativo. El flujo metodológico (Figura N°2) considera seis grandes etapas, las que se proceden a detallar a continuación:



Fuente: Elaboración propia

### *Variables y datos en resiliencia asociados a Mehuín*

Las variables de las dimensiones ambientales, físicas y sociales y los datos en relación a Mehuín fueron recopiladas de publicaciones precedentes que incluyen a Mehuín como caso de estudio en resiliencia comunitaria frente a tsunamis (Villagra et al., 2016; Villagra et al., 2017). Las variables de la dimensión física se refieren a características de la forma urbana que permiten la adaptación y evacuación de la comunidad en caso de tsunamis. Las variables relacionadas a la dimensión ambiental se refieren a los recursos naturales disponibles en el sistema de estudio, o anexo a éste, que están disponibles para satisfacer necesidades básicas post-desastre o mitigar el efecto de tsunamis (en este caso). Por último, las características sociales de la comunidad están considerados en las variables de la dimensión social. El efecto de cada variable sobre la resiliencia comunitaria ante tsunamis, particularmente en el caso de Mehuín, se puede encontrar en la siguiente tabla (Cuadro N°1).

**Cuadro N°1**

Variables que influyen en la resiliencia comunitaria de Mehuín frente a un tsunami

<b>Dimensión</b>	<b>Variable</b>	<b>Efecto en la resiliencia</b>
Ambiental Ambiental	Altura de dunas naturales	Funcionan como barreras naturales de la acción marina hacia el continente, amortiguando la acción de marejadas y tsunamis (Castro, 1985). Es fundamental la conservación de estos ecosistemas costeros, ya que a mayor altura y densidad vegetacional, hay mayor mitigación de los daños provocados por un tsunami (Peña-Cortés et al. 2008), y en consecuencia mayor es la resiliencia.
	Cobertura de dunas naturales	
	Buffer de inundación natural	Ríos, llanuras aluviales o humedales, prestan servicios fundamentales que ayudan a mitigar el efecto de eventos climáticos y naturales (Beatley & Newman, 2013), aportando a la resiliencia.
	Buffer de bosque	El ancho y la densidad del bosque, la edad, diámetro y altura de los árboles, y la composición de las especies son características que inciden en el nivel de mitigación que puede alcanzar un bosque (Forbes & Broadhead, 2007).
	Distancia de provisión de agua	La naturaleza ofrece diversos servicios ecosistémicos a la población en caso de una emergencia, siendo los de provisión (agua, alimento, leña, entre otros) los que poseen una directa relación con el bienestar de las personas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), al permitir satisfacer necesidades básicas luego de un desastre, lo cual aporta a la adaptación.
	Distancia de provisión de alimentos	
	Distancia de provisión de leña	
	Tipo de suelo	Investigaciones han evidenciado que la estructura de suelos arenosos, al contrario de un suelo rocoso, sean poco resistente a los desastres (Bean & Dukes, 2015) lo cual genera un sistema poco robusto, y en consecuencia poco resiliente.
Física	Densidad de población	El incremento de la densidad poblacional trae mayores pérdidas frente a un peligro natural debido al aumento de la vulnerabilidad (White & Haas, 1975). A mayor densidad poblacional existe menor resiliencia (Villagra et al. 2014)
	Distancia de ruta de evacuación	La accesibilidad y distancia de las rutas de evacuación es fundamental para un eficiente traslado hacia las zonas de seguridad, principalmente de la población con discapacidad y tercera edad (Han et al., 2006). A menor distancia, mayor resiliencia.
	Índice de ruta de evacuación	Hace referencia a la cantidad de rutas necesarias para la evacuación eficiente de la población (Han et al. 2006). A mayor valor, hay mayor redundancia de rutas y en consecuencia, mayor resiliencia.
	Índice de balance	Este índice fue propuesto por Cervero & Duncan (2003), con el fin de presentar el equilibrio entre áreas construidas y no construidas. A mayor valor, menor densidad de área construida, por lo tanto, hay mayor resiliencia.
	Índice de instalaciones comunitarias	Las ciudades resilientes cuentan con una red sostenible de sistemas físicos y comunidades humanas (Godschalk, 2003), por lo tanto, a mayor valor de este índice, mayor resiliencia
	Índice de diversidad-Sistema espacio abierto	Hace referencia a la necesidad de contar con espacios multifuncionales, que ofrezcan diversas opciones de usos posterior a un desastre (Ahern, 2011), lo cual aporta a la resiliencia.
	Sistema de espacio abierto temporal	Las áreas alternas a los asentamientos humanos son parte de una red inactiva de calles, parques, entre otros, que en situaciones de crisis pueden ayudar a adaptarse a la incertidumbre proporcionando zonas de refugio temporal, de atención médica, entre otras necesidades prioritarias en estas circunstancias (Allan y Bryant, 2011).

Dimensión	Variable	Efecto en la resiliencia
Social	Organizaciones de emergencia (Capital social)	Para enfrentar los desastres, debe existir un número importante de voluntarios que participen en organizaciones de emergencia relacionadas con el rescate, recuperación y reconstrucción (Walsh, 2007). A mayor cantidad de voluntarios, mayor resiliencia.
	Organizaciones cívicas (Capital social)	Las personas que participan de organizaciones cívicas es más probable que posean algún nivel de capital social comunitario al que recurrir para conseguir ayuda más allá de su círculo familiar durante un desastre (Cutter et al., 2014). Por lo tanto, mientras mayor es la cantidad de organizaciones cívicas, mayor puede ser la resiliencia
	Población en estado de pobreza	Niveles altos de pobreza hacen disminuir la resiliencia de una comunidad. Las comunidades pueden aumentar la resiliencia frente a los desastres por medio de políticas salariales equitativas, asegurando un acceso justo a los recursos por parte de todos los grupos sociales (Cutter et al., 2014).
	Participación cívica de capital social	Una comunidad resiliente incluye una participación plena de los interesados públicos y privados (Godschalk et al., 2003).
	Población con necesidades especiales	Niveles altos de población con necesidades especiales hacen disminuir la resiliencia de una comunidad Esta sección de la población sufre problemas con la trasmisión y recepción de alertas, el transporte, la evacuación, el refugio y la recuperación a largo plazo (National Council on Disability., 2009).
	Simulacros de tsunamis	Una mayor cantidad de simulacros debiera entregar una mayor resiliencia a la comunidad, ya que capacitan a la población en realizar una rápida y eficiente evacuación (Villagra et al., 2017).

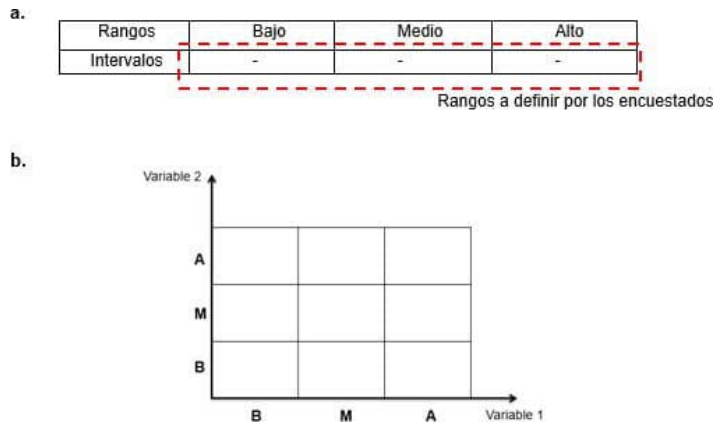
Fuente: Elaborado en base a Villagra et al. (2016)

### *Integración del conocimiento experto*

Una de las características de los Mapas Cognitivos Difusos es que permite a los expertos definir las variables y las relaciones entre los conceptos en base a reglas lingüísticas (Salmeron, 2009). La primera encuesta buscaba que se determinaran los rangos difusos bajo, medio y alto de cada una de las variables en estudio, con la finalidad de poder desarrollar las funciones de pertenencia. Para ello, se entregaban los rangos de variación respectivo de cada variable y se solicitaba su clasificación en los rangos antes mencionados en base a una situación hipotética expuesta (ver Figura N°3.a). Luego, en una segunda encuesta, se definieron las reglas difusas o lingüísticas que gobiernan el comportamiento del sistema y que son de la forma Si - Entonces (Estrada, 2006). La metodología utilizada permitía a los encuestados proyectar las relaciones indirectas, en base a tres escenarios propuestos para la variable 1 o independiente, contando con tres posibles respuestas (bajo, medio y alto) de la variable 2 o dependiente ante cada escenario propuesto (ver Figura N°3.b). Se utilizó un muestreo por conveniencia dado que en esta situación los participantes fueron seleccionados por dos motivos: relación con la temática en estudio y su disponibilidad para ser encuestados. Bajo estos criterios, se trabajó con cinco profesionales pertenecientes a la ONEMI región de Los Ríos, Hospital Base de Valdivia y Universidad Austral de Chile, además de cinco estudiantes de la carrera de Geografía de la misma institución académica.

**Figura N° 3**

- (a) Metodología de clasificación de las variables en rangos difusos con respecto a su rango de variación.
- (b) Metodología para determinar las reglas lingüísticas de las relaciones indirectas.



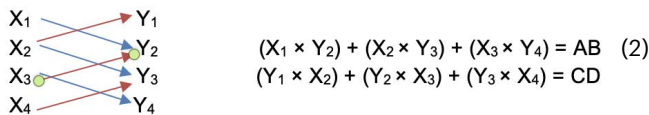
Fuente: Elaboración propia

### Modificación de las funciones de pertenencia

A causa de que las funciones de pertenencia no adquirirían la forma trapezoidal proyectada (Revelo, 2006), en base a las respuestas entregadas por los encuestados, fue necesario desarrollar una matriz que transformará las funciones. Esta matriz calcula cada área de los polígonos que forman los rangos difusos y los multiplica por cada grado de pertenencia medio. El área de cada polígono se calculó utilizando el método de cruces que se explica a continuación:

Puntos de un polígono: A (X<sub>1</sub>,Y<sub>1</sub>) ; B (X<sub>2</sub>,Y<sub>2</sub>) ; C (X<sub>3</sub>,Y<sub>3</sub>) ; D (X<sub>4</sub>,Y<sub>4</sub>)

Primero se realizan los productos diagonales de X e Y respectivamente, para luego sumar estos valores.



Finalmente, el área del polígono se calcula:

$$\text{Área de Polígono} = \frac{|AB-CD|}{2} \quad (3)$$

Las nuevas áreas obtenidas pueden variar en el rango de un 87% a 113% del área del polígono original, esto determinado por los autores a causa de la complejidad para hacer coincidir los tres rangos difusos por variable.



## Valorización de relaciones indirectas

Se seleccionó un sistema difuso de tipo Mamdani (Mamdani & Assilian, 1975), que se caracteriza por poseer en la entrada una etapa de fusificación que consta de llevar el valor numérico de la variable a un valor difuso (Kouro & Musalem, 2002). Además, en la salida se encuentra un bloque de defusificación que transforma el valor difuso resultante en un número real (Tremante & Brea, 2014). La integridad de esta etapa se realizó en el software MATLAB, específicamente en su extensión fuzzy logic.

Las relaciones se representan a través de la recta que forman las variables involucradas, donde las abscisas (x) corresponden a los valores bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto de la variable input y la ordenada (y) pertenece al valor defusificado de la variable output tras ser ingresadas al software Matlab. Con la recta obtenida se calculó la pendiente que representará el peso de la relación y que determinará el grado de influencia de la variable independiente sobre la dependiente. Para transformar la pendiente en un ángulo, se utilizó la función arco tangente que se aplica a la pendiente de una recta interpolante o línea de tendencia. Una vez obtenido el ángulo, se dividió por 90 para obtener un factor que varíe entre 0 a 1 (si la relación es negativa este resultado variará entre -1 a 0) y así finalmente conseguir el peso de la relación que será ingresado en el software Mental Modeller.

## Valorización de relaciones directas

Para las relaciones directas se propuso una matriz de importancia que compara cada una de las variables entre sí y busca crear un ranking de influencia sobre la resiliencia. Al realizar la comparación entre dos variables, se le otorgó el valor de 1 a la variable que presente una mayor influencia sobre la resiliencia comunitaria en base a la percepción del encuestado, mientras que la variable restante obtuvo el valor 0. El ranking se creó en base a la sumatoria de los valores otorgados por el encuestado. Finalmente, el peso de la relación se obtiene mediante:

$$\text{Peso Relación (Variable X – Resiliencia)} = \frac{\text{Sumatoria de valores de variable X}}{\text{Sumatoria total de valores}} \quad (4)$$

## Modelación del sistema

Una vez obtenida la totalidad de los pesos de las relaciones directas e indirectas del sistema, se procedió al ingreso de los datos en el software Mental Modeller. El objetivo de este software es facilitar la construcción del modelo centrado en el usuario, promoviendo el aprendizaje en comunidades de partes interesadas dispares mediante el intercambio de conocimientos y flexibilidad, para que los usuarios refinen y prueben sus modelos destinados a facilitar la planificación del manejo adaptativo (Gray et al., 2013).

En la interfaz de mapeo conceptual del software, se ingresaron las veintiún variables más la resiliencia (como variable). Luego se agregaron las relaciones de borde y su dirección, las cuales le entregan la funcionalidad al sistema. Finalmente se ingresó el peso de cada una de las relaciones que puede ser positivo o negativo.

### Identificación de propuestas

El software incluye una interfaz de Métricas, que está compuesta de diversas características del sistema que nos facilitan entender su funcionamiento y proyectar posibles cambios a realizar (Gray et al., 2013). En base a la métrica "centralidad", que indica la sumatoria del grado de salida y de entrada de cada una de las variables en el funcionamiento del sistema, se desarrolla un ranking de influencia que es comparado con una tabla de probabilidad de cambio de cada variable, permitiendo identificar aquellas que pueden ser intervenidas en post del aumento de la resiliencia comunitaria de Mehuín frente a un tsunami.

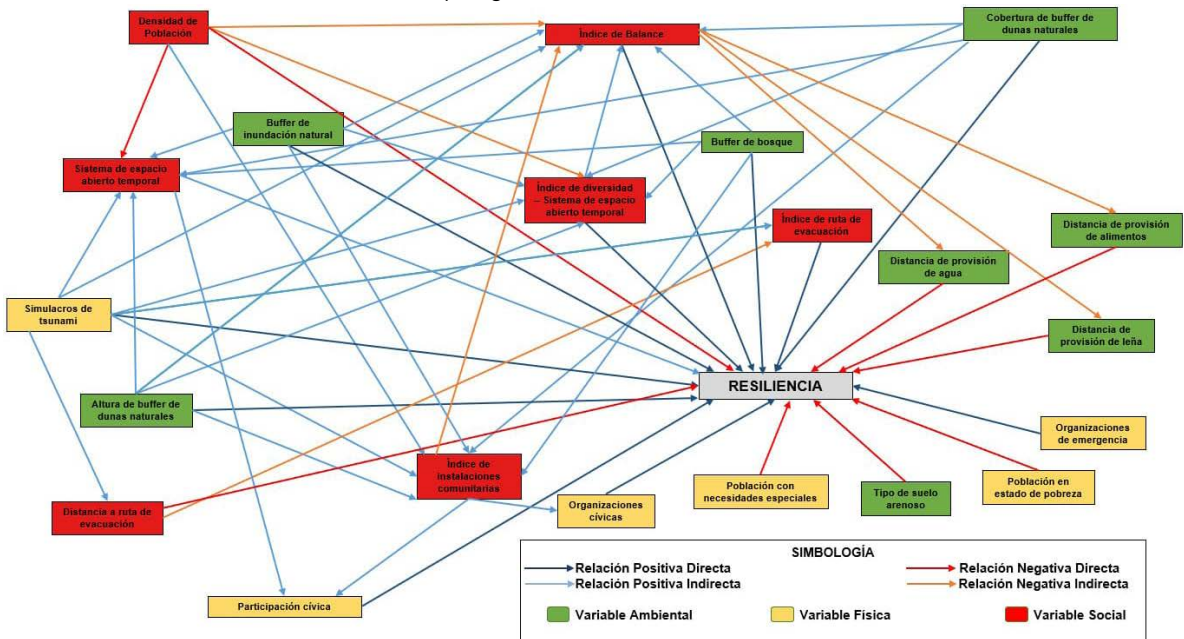
Finalmente, teniendo realizado el ranking de influencia se desestimaron las relaciones que cuentan con un peso insignificante, debido a que su injerencia en el funcionamiento del sistema es mínima. Una vez reconocidas estas relaciones se procede a filtrar el sistema, permaneciendo exclusivamente las variables y relaciones que puedan variar la resiliencia comunitaria de Mehuín, realizando de esta manera la propuesta del nuevo sistema.

## Resultados

La Figura N°4 presenta la visualización inicial del sistema Mehuín donde se identifican las veintinueve variables ambientales (verde), físicas (amarillo) y sociales (rojo) descritas en el Cuadro N°1. Se reconocen 56 relaciones que dan funcionalidad al sistema en estudio, de las cuales 21 son relaciones directas y 35 son indirectas.

Figura N° 4

Visualización de las veintinueve variables ambientales (verde), físicas (amarillo) y sociales (rojo), y de la tipología de relación entre ellas.



Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial de las variables en la Figura N°4 está relacionada exclusivamente a la correcta comprensión de la funcionalidad del sistema (relaciones), dado que los pesos de las relaciones y la centralidad son mencionados en párrafos posteriores.

Los rangos difusos fueron determinados en la primera encuesta realizada, a continuación (Cuadro N°2), se presenta la clasificación llevada a cabo por cada uno de los encuestados para la variable “índice de balance”.

**Cuadro N°2**  
Clasificación de rangos difusos de la variable “índice de balance”

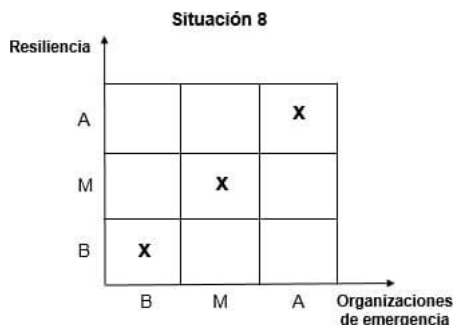
<b>Profesional</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Estudiante</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Profesional N°1	0-1	1-3	3-4	Estudiante N°1	0-1	1-3	3-4
Profesional N°2	0-1	1-3	3-4	Estudiante N°2	0-1	1-3	3-4
Profesional N°3	0-1	1-2	2-4	Estudiante N°3	0-2	2-3	3-4
Profesional N°4	0-1	1-2	2-4	Estudiante N°4	0-0,25	0,25-1	1-4
Profesional N°5	0-1	1-3	3-4	Estudiante N°5	0-2	2-3	3-4

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las respuestas de los encuestados, se procedió a desarrollar las funciones de pertenencia de cada uno de los rangos difusos resultantes del análisis de las encuestas. En base a esto, se obtuvieron las funciones de pertenencia que no adquirirían la forma trapezoidal deseada para el ingreso posterior en el software Matlab (Mathworks®) (ver Figura 6.a).

Las reglas difusas o lingüísticas permiten conectar cada una de las variables y dar funcionamiento al sistema. La figura N°5 muestra la relación resultante, a causa de las respuestas de la segunda encuesta, entre las variables organizaciones de emergencia y resiliencia.

**Figura N° 5**  
Visualización de relación directa entre organizaciones de emergencia y resiliencia



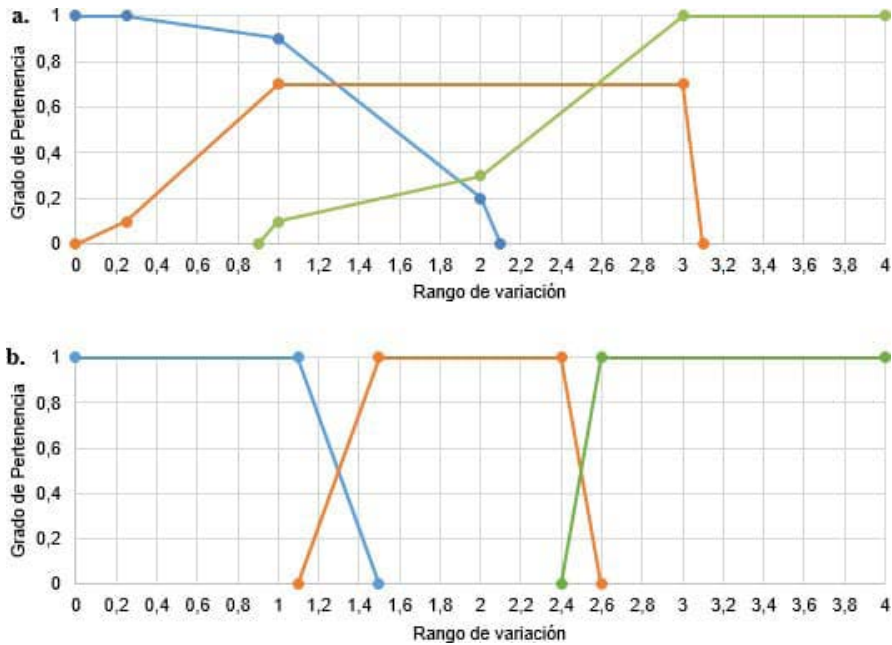
Fuente: Elaboración propia

1. Si *Organizaciones de emergencia* es bajo ENTONCES *Resiliencia* es bajo
2. Si *Organizaciones de emergencia* es medio ENTONCES *Resiliencia* medio
3. Si *Organizaciones de emergencia* es alto ENTONCES *Resiliencia* alto

Como se mencionó anteriormente, en base a las respuestas de los encuestados se obtuvieron funciones de pertenencia irregulares (Figura 6.a), por lo que fue necesario desarrollar una matriz Excel para transformarlas en funciones de pertenencia trapezoidal deseadas (ver Figura 6.b).

**Figura N°6**

(a) Estructura de los rangos difusos de la variable “índice de balance” en base a las respuestas de los encuestados; (b) Nuevos rangos difusos posterior al procesamiento en la matriz Excel



Nota: En línea azul aparece el rango bajo, el rango medio en naranja y el rango alto en verde. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro N°3 se muestra la representatividad de las áreas para las nuevas funciones de pertenencia de la variable “índice de balance”, con respecto a las áreas de las funciones irregulares obtenidas de las respuestas de la encuesta N°1.

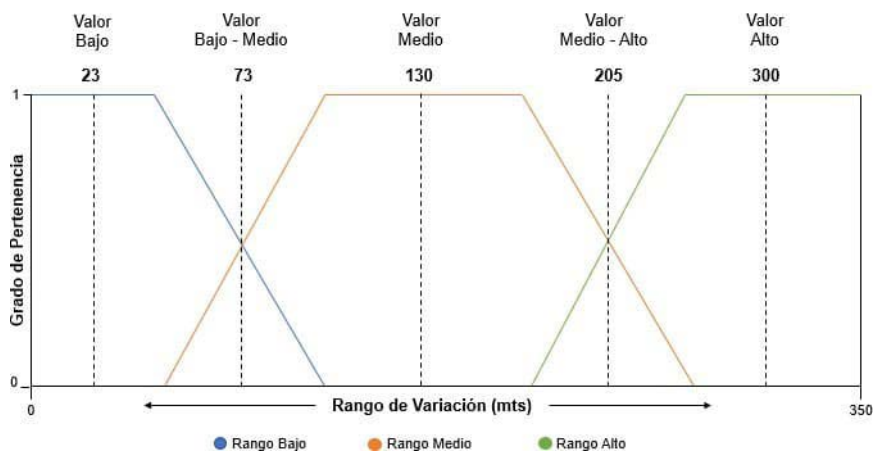
**Cuadro N°3**  
Representatividad de las nuevas funciones de pertenencia

Variable	Bajo (%)	Medio (%)	Alto (%)
Índice de balance	96,78	96,5	97,03

Fuente: Elaboración propia

La relación de las variables se cuantificó a través del cálculo de los pesos, para lo cual en primer término se obtuvo los valores de la variable input, que posteriormente fueron ingresados al software Matlab. La Figura N°7 representa los valores input determinados para la variable “buffer de bosque”.

**Figura N°7**  
Determinación de los valores input de la variable “buffer de bosque” (metros)  
**BUFFER DE BOSQUE**



Fuente: Elaboración propia

Al ser ingresados cada uno de estos valores en el programa Matlab, específicamente en la extensión fuzzy logic, se fueron adquiriendo los valores defusificados (variable output), es decir, la componente y de la relación en estudio. En este caso, se muestra la relación positiva entre las variables “buffer de bosque” y “sistema de espacio abierto temporal” (Cuadro N°4). Los valores del Cuadro N°4, indican las coordenadas de los diferentes puntos que componen la gráfica de la relación (Figura N°8). Las relaciones son obtenidas de la Figura N°4, que se basa en la publicación precedente (Villagra et al., 2017).

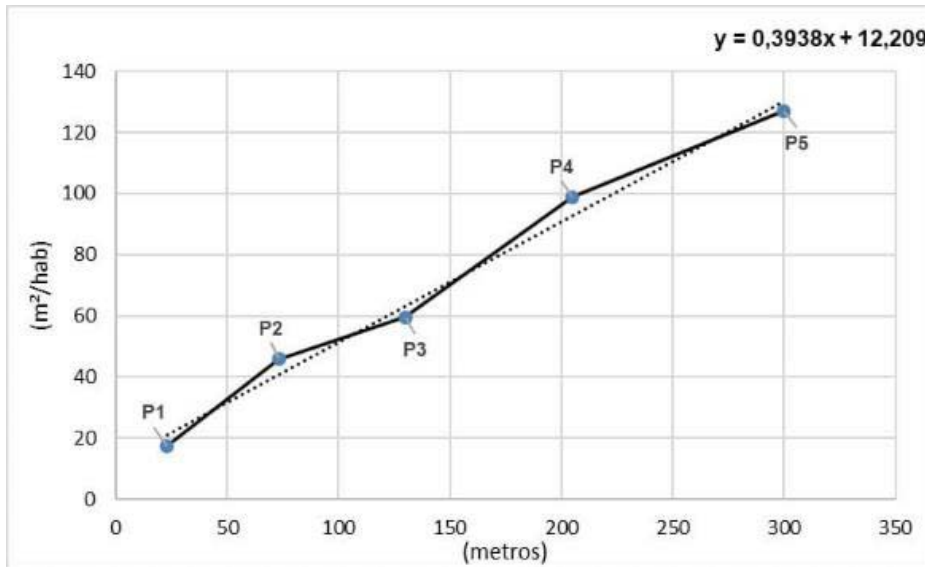
**Cuadro N°4**  
Valores defusificados de la relación indirecta positiva

Punto (x,y)	Variable Input (x)	Variable Output (y)
-	Buffer de bosque	Sistema de espacio abierto temporal
<b>P1</b>	23	17,5
<b>P2</b>	73	45,9
<b>P3</b>	130	59,6
<b>P4</b>	205	98,9
<b>P5</b>	300	127

Fuente: Elaboración propia

**Figura N°8**

Gráfico de la relación entre las variables “buffer de bosque” (metros) y “sistema de espacio abierto temporal” ( $m^2/hab$ )



Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica anterior, se obtiene el valor de 0,393 como pendiente de la relación de las variables involucradas. Al realizar la transformación de la pendiente a un ángulo, por medio de la función arco tangente, y dividirlo por 90 con la finalidad de que el valor varíe entre 0 a 1, resulta finalmente el peso de la relación con un valor de 0,238.

Con respecto a las relaciones directas, que fueron abordadas a través de la matriz de importancia, se presenta una tabla en orden decreciente del peso de influencia de cada una de las variables sobre la resiliencia comunitaria de Mehuín frente a un tsunami (Cuadro N°5). En color azul se presentan las variables que poseen una relación positiva directa con la resiliencia y en color rojo se aprecian las que poseen una relación negativa directa.

**Cuadro N°5**

Ranking de las relaciones directas según su peso de influencia (decreciente según su valor absoluto)

Ranking Final		Peso de Influencia	Ranking Final	Peso de Influencia	
1°	Altura de buffer de dunas naturales	0,085	12°	Organizaciones de emergencia	0,042
	Cobertura de buffer de dunas naturales	0,085	13°	Organizaciones cívicas	0,038
	Densidad de población	-0,085	14°	Población con necesidades especiales	-0,028

Ranking Final		Peso de Influencia	Ranking Final		Peso de Influencia
4°	Buffer de inundación natural	0,080	15°	Población en estado de pobreza	-0,023
5°	Buffer de bosque	0,071		Índice de instalaciones comunitarias	0,023
6°	Simulacros de tsunamis	0,066		Sistema de espacio temporal	0,023
7°	Participación cívica	0,061		Índice de balance	0,023
	Distancia provisión de alimentos	-0,061	19°	Distancia provisión de leña	-0,009
	Distancia provisión de agua	-0,061		Índice de diversidad-Sistema de espacio abierto temporal	0,009
10°	Índice de ruta de evacuación	0,057	21°	Tipo de suelo arenoso	-0,004
111°	Distancia de ruta de evacuación	-0,052			

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tras ingresar la totalidad de los pesos de las relaciones en el software Mental Modeler y realizar las simulaciones, se obtuvo la centralidad de cada una de las variables con sus respectivas posibilidades de intervención, para así determinar las variables susceptibles a cambio por medio de acciones preventivas (Cuadro N°6).

**Cuadro N°6**

Ranking decreciente en base a la métrica centralidad de incidencia.

Variables	Centralidad de incidencia	Posibilidad de intervención
Simulacros de tsunamis	3,68	Se puede modificar
<b>Índice de balance</b>	<b>3,01</b>	<b>Se puede modificar</b>
<b>Altura de buffer de dunas naturales</b>	<b>2,51</b>	<b>Se puede proteger</b>
<b>Índice de instalaciones comunitarias</b>	<b>2</b>	<b>Se puede modificar</b>
<b>Buffer de inundación natural</b>	<b>1,13</b>	<b>Se puede proteger</b>
Densidad de población	1,12	No se puede modificar
Cobertura de buffer de dunas naturales	0,78	Se puede proteger
Índice de diversidad-sistema de espacio abierto temporal	0,77	Se puede modificar
Buffer de bosque	0,35	Se puede modificar
Sistema de espacio abierto temporal	0,16	Se puede modificar
Distancia de ruta de evacuación	0,06	Se puede modificar
Distancia de provisión de alimentos	0,06	Se puede modificar
Distancia de provisión de agua	0,06	Se puede modificar
Índice de ruta de evacuación	0,06	Se puede modificar
Participación cívica	0,06	Se puede modificar
Organizaciones de emergencias	0,04	Se puede modificar
Organizaciones cívicas	0,04	Se puede modificar
Población con necesidades especiales	0,03	No se puede modificar
Población en estado de pobreza	0,02	No se puede modificar a corto o mediano plazo
Tipo de suelo	0,01	Se puede modificar
Distancia de provisión de leña	0,01	Se puede modificar

Fuente: Elaboración propia.

La métrica centralidad de incidencia, entregada por el software Mental Modeller, indica la sumatoria del grado de salida con el grado de entrada representando la influencia general que tiene cada una de las variables en la funcionalidad del sistema. Por su parte, la columna posibilidad de intervención representa la probabilidad de cambio que tiene la variable con el fin de aumentar la resiliencia comunitaria frente a un tsunami, esto a criterio de los autores en base a literatura internacional (por ej. Forbes & Broadhead, 2007) y conocimiento de la realidad nacional. Finalmente, las cinco primeras filas representan las variables que pueden ser intervenidas y tendrían una mayor injerencia en la búsqueda del aumento de la resiliencia comunitaria, basado en los resultados entregado en el modelo mediante el software Mental Modeller.

Se puede apreciar en el Cuadro N°6, dos grandes grupos de acuerdo con la centralidad de incidencia. El primero está compuesto por las variables que presentan una injerencia importante en la dinámica del sistema, siendo encabezada por simulacros de tsunamis (3,68) hasta sistema de espacio abierto temporal (0,16). El segundo grupo se caracteriza por presentar una insignificante importancia en la articulación del sistema Mehuín frente a una amenaza de tsunami, dentro del cual se encuentra distancia de ruta de evacuación (0,06), distancia de provisión de alimentos y agua (0,06), índice de ruta de evacuación (0,06), entre otros. Por su parte, en la columna posibilidad de intervención existen cuatro categorías de variables, las cuales son: Se puede modificar; no se puede modificar; se puede proteger; y no se puede modificar a corto o mediano plazo, esto con la finalidad de indicar la probabilidad de cambio en busca del aumento de la resiliencia comunitaria. Finalmente, en base a la métrica centralidad entregada por el software Mental Modeller, se realiza la selección de las variables con mayor incidencia en el sistema y por ende al ser intervenidas se tendría un uso eficiente de los esfuerzos y recursos por parte de las autoridades en busca del aumento de la resiliencia comunitaria frente a un tsunami en la localidad de Mehuín.

## Discusión y Conclusión

El modelo desarrollado nos permitió, a diferencia de otros modelos desarrollados previamente (ej. Cutter et al. 2014; Villagra et al. 2017), identificar las interacciones entre las variables y cuantificar las ponderaciones (i.e. pesos) para analizar los efectos sinérgicos sobre la resiliencia. Esta aproximación aporta a cubrir las necesidades que se han detectado en base al análisis de los modelos que se desarrollan en resiliencia frente al desastre actualmente (ej. Xu et al. 2020; Sharifi, 2016). Hay vacíos en el desarrollo de los modelos existentes dentro de los cuales se destaca la falta de cuantificar las relaciones e interdependencias entre variables y dimensiones de análisis, y las ponderaciones o contribuciones relativas de las variables a la construcción de la resiliencia.

Nuestra aproximación, concede la posibilidad de obtener resultados más precisos sobre las relaciones de las variables, y en consecuencia, sobre las variables en las cuales hay que priorizar en el proceso de planificación y desarrollo del territorio. Por ejemplo, Villagra et al (2016), había descrito que las variables de las dimensiones físicas y ambientales tienen un mayor efecto en la resiliencia comunitaria de Mehuín. Sin embargo, el modelo dinámico desarrollado en este trabajo permite reconocer que no todas las variables físicas y ambientales son las relevantes; de las 10 variables con mayor centralidad del sistema, 5 son físicas, 3 ambientales y 2 son sociales.



Entre las variables de la dimensión física, el índice de balance adquiere la mayor influencia en el funcionamiento del sistema, definiéndose como la representación del equilibrio entre las zonas no construidas y construidas (Cervero & Duncan, 2003). Este resultado toma relevancia en el contexto nacional ya que usualmente, la respuesta institucional post desastre favorece la construcción de viviendas e infraestructuras de servicios y emergencia en tiempos acotados (Herrmann, 2015), dejando de lado esfuerzos específicos dedicados al diseño e implementación de espacios abiertos como parques, plazas y otros que fortalecen la resiliencia comunitaria ante un desastre. Básicamente esto se debe a que los actuales planificadores urbanos y las autoridades se centran en volver lo antes posible a la normalidad, sin incluir cambios que solucionen susceptibilidades específicas frente a perturbaciones futuras (Tumini et al. 2017). Esta estrategia, a menudo, impide ver la oportunidad de reconstruir a partir de los pilares de la resiliencia y evitar que ante un eventual nuevo impacto se reiteren las mismas consecuencias (Mazzorana, 2020). En base a las relaciones encontradas en nuestro estudio, podemos sugerir que para llevar consigo un aumento del índice de balance, es decir un incremento del área no construida, se debe modificar el índice de diversidad-sistema de espacio abierto temporal. Esta variable física hace referencia a la necesidad de contar con una red de espacios multifuncionales, que ofrezcan diversas opciones de usos posterior a un desastre, lo cual favorece la resiliencia (Ahern, 2011). Esta diversidad de espacios permite satisfacer las diferentes necesidades (recolección, seguridad, refugio, etc.) que pueden surgir después de un desastre, aumentando la capacidad de adaptación de la comunidad.

En cuanto a la dimensión ambiental, nuestro estudio corrobora la postura de Villagra et al. (2017) en cuanto a que la dimensión ambiental toma un rol importante en la resiliencia comunitaria. Sin embargo, el modelo dinámico nos permite detallar que, en particular, las variables de altura y cobertura de buffer de dunas naturales adquieren la mayor relevancia para la resiliencia de Mehuín. Ambas cumplen la función de barreras de mitigación en caso de tsunami ya que los sistemas naturales mejoran los tiempos de recuperación y la resiliencia de las comunidades costeras (Castro, 1985; Forbes & Broadhead, 2007; Harada & Imamura, 2005; Constanza et al., 2006). Aun así, en Chile estas áreas son consideradas principalmente para la recreación y el turismo (Gadino & Taveira, 2020). Uno de los problemas en las herramientas de planificación vigentes en las zonas costeras, a nivel regional y local, es que no se resguardan los ecosistemas litorales (humedales, dunas y bosques). Muchos se encuentran fuera de los límites urbanos actuales, por ende, no se les entrega la importancia que presentan en la mitigación de las amenazas naturales y la protección de las comunidades (Herrmann, 2015). Otros se encuentran dentro de zonas urbanas, pero se ven constantemente amenazados por la expansión urbana (Rojas et al. 2019). La recientemente creada Ley de Humedales Urbanos, puede ser un gran aporte en el resguardo de humedales para la resiliencia, y esperamos que, además, sea el punto de partida para resguardar otros sistemas naturales que aportan a la resiliencia frente al desastre.

En definitiva, en base a los resultados obtenidos, es posible priorizar las variables que son relevantes de mejorar para el caso de Mehuín. De esta manera, queda de manifiesto la importancia del modelo dinámico de adaptación preventiva en la búsqueda y consolidación de la resiliencia comunitaria frente a un tsunami. La ventaja de este modelo radica en basarse en la lógica difusa, la cual permite relacionar los elementos con conjuntos de fronteras no claramente definidos y entregándoles un grado de membresía, permitiendo representar el conocimiento humano de manera formalizada para la simulación cuantitativa (Kouro & Musalem, 2002). Esto permite que podamos dar un paso más adelante, ya que, al contar con las variables y sus relaciones, se puede

comprender el funcionamiento del sistema, reconociendo el rol de cada una de las variables y el peso o influencia de cada una de las relaciones que permitirán identificar donde enfocar los recursos para mejorar la resiliencia comunitaria frente al desastre. Esto nos permite, poder simular ciertas medidas preventivas en las variables reconocidas como fundamentales en el sistema, proyectando el posible impacto en el funcionamiento del sistema y esencialmente en el aumento de la resiliencia comunitaria. Es importante recalcar, que cada sistema territorial cuenta con características particulares que requieren una parametrización específica del modelo, esencialmente porque los rangos de variación de las variables son exclusivos de cada sistema, dando una ventaja de adaptabilidad del modelo.

En conclusión, este estudio pone en evidencia que el epifenómeno multidimensional resiliencia de una comunidad frente a una perturbación depende de la interacción entre las distintas variables subyacentes y cambios específicos en estas pueden conllevar a una cadena de cambios en pro o en contra de la resiliencia. Una modelación sistémica basada en la metodología empleada en este estudio facilita la identificación de medidas de adaptación preventiva eficaces. Es primordial, en todo caso, monitorear el sistema expuesto y los cambios realizados y obtener la retroalimentación para mejorar constantemente el modelo de adaptación preventiva.

## Agradecimientos

Se agradece a los proyectos FONDECYT Regular 1210540, FONDECYT Regular 1150137 y FONDECYT Regular 1200091 (SedImpact) por ser la base científica del presente artículo.

## Referencias

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 2011, Vol. 100, N° 4, p. 341-343. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.02.021

ALLAN, P & BRYANT, M. Resilience as a framework for urbanism and recovery. *Journal of Landscape Architecture*, 2011, Vol. 6, N° 2, p. 34-45. doi: 10.1080/18626033.2011.9723453

BASSO, S; MAZZORANA, B; ULLOA, H; BAHAMONDES, D; RUIZ-VILLANUEVA, V; SANHUEZA, D; IROUMÉ, A & PICCO, L. Unravelling the impacts to the built environment caused by floods in a river heavily perturbed by volcanic eruptions. *Journal of South American Earth Sciences*, 2020, Vol. 102. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102655

BEAN, E & DUKES, M. Effect of amendment type and incorporation depth on runoff from compacted sandy soil. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, Vol. 141, N° 6. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000840

BEATLEY, T & NEWMAN, P. Biophilic cities are sustainable, resilient cities. *Sustainability*, 2013, Vol. 5, N° 8, p. 3328-3345. doi: 10.3390/su5083328

BIAGINI, B; BIERBAUM, R; STULTS, M; DOBARDZIC, S & MCNEELEY, S. A typology of adaptation actions: A global look at climate adaptation actions financed through the Global Environment Facility. *Global Environmental Change*, 2014, Vol. 25, p. 97-108. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.01.003

CARVALHO, J. On the semantics and the use of fuzzy cognitive maps and dynamic cognitive maps in social sciences. *Fuzzy Sets and Systems*, 2013, Vol. 214, p. 6-19. doi: 10.1016/j.fss.2011.12.009

CASTRO, C. Reseña del estado actual de conocimiento de las dunas litorales de Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1985, Vol. 28, p. 13-32.

CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE (CSN). Sismicidad y terremotos en Chile. 2014. Disponible en Internet: [http://www.csn.uchile.cl/wpcontent/uploads/2014/06/001\\_terremotos\\_y\\_sismicidad\\_chile.pdf](http://www.csn.uchile.cl/wpcontent/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf)

CERVERO, R & DUNCAN, M. Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the San Francisco bay area. *American Journal of Public Health*, 2003, Vol. 93, N° 9, p. 1478-1483. doi: 10.2105/AJPH.93.9.1478

CONSTANZA, R; MITSCH, W & DAY, J. A new vision for New Orleans and the Mississippi Delta: Applying ecological economics and ecological Engineering. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, Vol. 4, N° 9, p. 465-472. doi: 10.1890/1540-9295(2006)4[465:ANVFNO]2.0.CO;2

CUTTER, S; ASH, K & EMRICH, C. The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 2014, Vol. 29, p. 65-77. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005

ESTRADA, E. Sistema de control difuso. 2006.

FORBES, K & BROADHEAD, J. The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007.

GADINO, I & TAVEIRA, G. Ordenamiento y gestión del territorio en zonas costeras con turismo residencial. El caso de Región Este, Uruguay. *Revista de geografía Norte Grande*, 2020, Vol. 77, p. 233-251. doi: 10.4067/S0718-34022020000300233

GODSCHALK, D. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 2003, Vol. 4, N° 3, p. 136-143. doi: 10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(136)

GODSCHALK, D; BRODY, S & BURBY, R. Public participation in natural hazard mitigation policy formation: Challenges for comprehensive planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2003, Vol. 46, N° 5, p. 733-754. doi: 10.1080/0964056032000138463

GRAY, S.A; COX, L; GRAY, S & HENLY-SHEPARD, S. Mental Modeler: A fuzzy logic cognitive mapping modelling tool for adaptive environmental management. *Conference: Proceedings of the 46th International Conference on Complex Systems*, 2013, p. 965-973. doi: 10.1109/HICSS.2013.399

GRAY, S.A; GRAY, S & ZANRE, E. Fuzzy cognitive maps as representations of mental models and group beliefs. En: PAPAGEORGIU, E.I. *Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms*. Springer, 2014, p. 29- 48. doi: 10.1007/978-3-642-39739-4\_2

HAN, L; YUAN, F; CHIN, S & HWANG, H. Global optimization of emergency evacuation assignments. *Interfaces*, 2006, Vol. 36, N° 6, p. 502-513. doi: 10.1287/inte.1060.0251

HARADA, K & IMAMURA, F. Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation- A preliminary investigation. En: SATAKE, K. *Tsunamis. Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer, 2005, Vol. 23, p. 279-292. doi: 10.1007/1-4020-3331-1\_17

HERRMANN, G. Urban planning and tsunami impact mitigation in Chile after february 27, 2010. *Natural Hazards*, Vol. 79, N° 3, p. 1591-1620. doi: 10.1007/s11069-015-1914-4

KOURO, S & MUSALEM, R. Control Mediante Lógica Difusa. 2002. Disponible en Internet: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>

KOSKO, B. El principio borroso. Spanish Theory, 1993.

LAGOS, M. Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2000, Vol. 27, p. 93-102. Disponible en Internet: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10436>

LAGOS, M & GUTIÉRREZ, D. Simulación del tsunami de 1960 en un estuario del centro-sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2005, Vol. 33, p. 5-18. Disponible en Internet: <https://www.redalyc.org/pdf/300/30003301.pdf>

LAGOS, M; RAMÍREZ, M; ARCAS, D; GARCÍA, C & SEVERINO, R. Magnitude and impact from the 2010 Chilean tsunami. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, 2010, Vol. 91, N° 26.

LARA, L. The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, 2009, Vol. 36, p. 125-130. doi: 10.5027/andgeoV36n1-a09

MAMDANI, E & ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, Vol. 7, p. 1-13. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2

MAZZORANA, B. Hacia un marco conceptual y gestión participativa de los riesgos naturales en Chile. En: BORSODORF, A; MARCHANT, C; ROVIRA, A & SÁNCHEZ, R. *Chile Cambiando. Revisitando la Geografía Regional de Wolfgang Weischet*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2020.

MAZZORANA, B & FUCHS, S. Fuzzy formative scenario analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. *Environmental Modelling and Software*, 2010, Vol. 25, N° 10, p. 1208-1224. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.030

MAZZORANA, B; RUIZ-VILLANUEVA, V; MARCHI, L; CAVALLI, M; GEMS, B; GSCHNITZER, T; MAO, L; IROUMÉ, A & VALDEBENITO, G. Assessing and mitigating large wood-related hazards in mountain streams: recent approaches. *Journal Flood Risk Management*, 2018, Vol. 11, N°2, p. 207-222. doi: 10.1111/jfr3.12316

MOUTON, A; DE BAETS, B & GOETHALS, P. Knowledge-based versus data-driven habitat suitability models for river management. *Environmental Modelling and Software*, 2009, Vol. 24, N° 8, p. 982-993. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.02.005

REVELO, S. Simulación de un convertidor multinivel apilable controlado con lógica difusa. Tesis de Magister en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica. Puebla: Universidad de las Américas, México, 2006.

ROJAS, C; MUNIZAGA, J; ROJAS, O; MARTINEZ, C & PINO, J. Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, Vol. 80, p. 47-56. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.09.036

ROMMELFANGER, H & EICKEMEIER, S. Entscheidungstheorie: Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen. Springer, Heidelberg, 2001.

SALMERON, J.L. Supporting decision makers with fuzzy cognitive maps. *Research Technology Management*, 2009, Vol. 52, N° 3, p. 53-59. doi: 10.1080/08956308.2009.11657569

SHARIFI, A. A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological Indicators*, 2016, Vol. 69, p. 629-647. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.05.023

SMITH, B & WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, Vol. 16, N°3, p. 282-292. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

TREMANTE, P & BREA, E. Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 2014, Vol. 4, N° 12, p. 121-136. Disponible en Internet: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215037911010>

TUMINI, I; VILLAGRA, P & LUNECKE, G. Evaluating reconstruction effects on urban resilience: a comparison between two Chilean tsunami-prone cities. *Natural Hazards*, Vol. 85, N°3, p. 1363-1392. doi: 10.1007/s11069-016-2630-4

VERGINI, E & GROUMPOS, P. A new conception on the fuzzy cognitive maps method. *IFAC-Papers onLine*, 2016, Vol. 49, N°29, p. 300-304. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.083

VILLAGRA, P; ROJAS, C; OHNO, R; XUE, M & GOMEZ, K. A gis-base exploration of the relationships between open space systems and urban form for the adaptive capacity of cities after an earthquake: the cases of Chilean cities. *Applied Geography*, 2014, Vol. 48, p. 64-78. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.01.010

VILLAGRA, P; HERRMANN, G; QUINTANA, C & SEPÚLVEDA, R. Resilience thinking and urban planning in a coastal environment at risk of tsunamis: the case study of Mehuín, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2016, Vol. 64, p. 63-82. doi: 10.4067/S0718-34022016000200006

VILLAGRA, P, HERRMANN, G; QUINTANA, C & SEPÚLVEDA, R. Community resilience to tsunamis along the Southeastern Pacific: a multivariate approach incorporating physical, environmental and social indicators. *Natural Hazards*, 2017, Vol. 88, N° 2, p. 1087-1111. doi: 10.1007/s11069-017-2908-1

VOINOV, A & BOUSQUET, F. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling and Software*, 2010, Vol. 25, N°11, p. 1268-1281. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.007

WALKER, B; HOLLING, C; CARPENTER, S & KINZIG, A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, Vol. 9, N° 2, Art. 5. doi: 10.5751/ES-00650-090205

WALSH, F. Traumatic loss and major disasters: strengthening family and Community resilience. *Family Process*, 2007, Vol. 46, N° 2, p. 207-227. doi: 10.1111/j.1545-5300.2007.00205.x

WHITE, G & HAAS, J. *Assessment of Research on Natural Hazards*. MIT Press, Cambridge, 1975.

XU, H; LI, Y & Wang, L. Resilience Assessment of Complex Urban Public Spaces. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, Vol. 17, N° 2, Art. 524. doi: 10.3390/ijerph17020524

ZADEH, L. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, Vol. 8, N° 3, p. 338-353. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X

ZADEH, L. Probability measures of fuzzy events. *Journal of mathematical analysis and applications*, 1968, Vol. 23, N° 2, p. 421-427. doi: 10.1016/0022-247X(68)90078-4

## Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.