

Aplicación de sistemas fuzzy para la toma de decisiones del Plan Paso a Paso: análisis de los indicadores para la comuna de Valdivia

DANIEL E. SÁNCHEZ^{1,a}, CLAUDIO A. MÉNDEZ^{2,b}, GINA BRUN^{3,c}, MARCELA TRAUB-MUÑOZ^{2,d}, LAÉCIO^c, BARROS^{4,e}

Artificial intelligence fuzzy system for the design of confinements during quarantines

Background: Different modalities of quarantines were one of the main measures implemented worldwide to avoid the spread of SARS-CoV2 virus. **Aim:** To analyze and compare retrospectively the implementation of the Step-to-Step plan devised by the Chilean Ministry of Health during the pandemic. To propose a decision-making path based on an artificial intelligence fuzzy system to determine confinements in specific territories. **Material and Methods:** The Step-to-Step Plan threshold values such hospital network capacity, epidemic spreading, testing and contact tracing capability were modeled using fuzzy numbers and fuzzy rule-based systems. **Results:** Ministry of Health's decision-making opportuneness were unrelated with the Step-to-Step Plan indicators for deconfinement. Such disagreements undermined epidemiological indicators. **Conclusions:** Using an artificial intelligence system could improve decision-making transparency, emergency governance, and risk communication to the population.

(Rev Med Chile 2023; 151: 197-205)

Key words: Chile; COVID-19; Fuzzy Logic; Quarantine.

El 30 de enero de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el brote del nuevo coronavirus como una Emergencia de Salud Pública de Importancia Internacional¹ y el 11 de marzo de 2020, el director general de la OMS, se refirió al COVID-19 como una pandemia². Una de las principales medidas implementadas por diversos países, fueron las cuarentenas.

Las cuarentenas son aquellas medidas de confinamiento que restringen la movilidad en un cierto territorio y que buscan evitar la propagación de enfermedades infecciosas entre las personas³. En Europa, inicialmente las cuarentenas permitieron evitar aproximadamente tres millones de muertes

en los países más afectados por el COVID-19⁴. En países de bajos y medianos ingresos, se han descrito cuarentenas intermitentes, intentando ponderar la protección a la vida y a los medios de subsistencia⁵. Países en América Latina implementaron cuarentenas que no estuvieron exentas de los efectos negativos asociados a la necesidad de políticas sociales que permitieran mantener los confinamientos⁶⁻⁹.

En Chile, se optó inicialmente por cuarentenas dinámicas (intermitentes) a nivel comunal¹⁰⁻²¹. En un esfuerzo por estandarizar la toma de decisiones, el gobierno anunció el 20 de julio de 2020, la implementación de un sistema de indicadores para el

¹Centro de Docencia de Ciencias Básicas para Ingeniería, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.

²Instituto de Salud Pública, Facultad de Medicina, Universidad Austral de Chile.

³Servicio de Salud Valdivia.

⁴Departamento de Matemática Aplicada, Instituto de Matemática, Estadística y Computación Científica, Universidad Estadual de Campinas.

⁵Ingeniero Acústico, Doctor en Matemática Aplicada.

⁶Matrón, Magíster en Salud Pública.

⁷Médico de Familia, Magister en Ciencias de la Salud.

⁸Licenciada en Medicina, Médica de Familia.

⁹Licenciado en Matemáticas, Doctor en Matemática Aplicada.

Recibido el 15 de abril de 2021, aceptado el 16 de diciembre de 2022.

Trabajo no recibió financiamiento. Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia a:
Daniel E. Sánchez
General Lagos 2086, Campus
Miraflores, Valdivia.
danielsanchez@uach.cl

Tabla 1. Indicadores del Plan Paso a Paso y sus umbrales

Criterios	Cuarentena a Transición	Transición a Preparación	Preparación a Apertura Inicial
Ocupación UCI Nacional	≤ 90%	≤ 85%	≤ 85%
Ocupación UCI Regional	≤ 85%	≤ 85%	≤ 80%
Re	< 1	< 1	< 1
Tasa casos nuevos (media móvil semanal)	< 10/100.000	< 10/100.000	< 5/100.000
Positividad (7 días)	≤ 10%	≤ 8%	≤ 4%
Casos aislados desde la notificación de sospecha/probable	80% < 48 h	80% < 48 h	90% < 48 h
Contactos en cuarentena desde diagnóstico del caso confirmado/probable	60% < 48 h	70% < 48 h	80% < 48 h
Casos nuevos que vienen de contactos en seguimiento	60%	60%	70%
Vigilancia activa en población de riesgo	Búsqueda activa periódica	Búsqueda activa periódica	Búsqueda activa periódica

confinamiento gradual llamado Plan Paso a Paso. Dichos indicadores contemplan valores umbrales sobre la capacidad de la red asistencial y variables epidemiológicas obtenidas territorialmente (Tabla 1). Basado en este Plan, y probablemente en otras consideraciones no detalladas, el Ministerio de Salud (MINSAL) decide en forma centralizada y anuncia semanalmente la fase de confinamiento que debe regir para cada comuna en el siguiente período. Las únicas regiones que iniciaron este Plan con una fase de apertura inicial (fase 4), fueron Aysén y Los Ríos, ambas ubicadas en el sur del país. La capital de esta última es la comuna de Valdivia.

Dado el avance tecnológico disponible, la toma de decisiones basada en múltiples factores, como en salud pública, puede ser auxiliada por algoritmos computacionales, minimizando así posibles errores de subjetividad humana¹¹. Así, tecnologías de inteligencia artificial de aprendizaje automático, conocidas como “Machine Learning”, pueden ser usadas como apoyo a la toma de decisión para evaluación diagnóstica y riesgo en pacientes afectados por COVID-19¹²⁻¹⁴. Sin embargo, en general, este tipo de tecnología requiere una gran cantidad de datos y una actualización en tiempo real de éstos^{15,16}. Otro tipo de apoyo, también basado en inteligencia artificial, puede ser encontrado en los sistemas basados en reglas fuzzy (SBRF)¹⁷, que han sido establecidos previamente como soporte para la toma de decisiones en salud^{18,19} y modelamiento biomatemático^{20,21}. Actualmente, estos sistemas

fuzzy han sido utilizados en el modelamiento de COVID-19^{22,23}.

Esta investigación tiene por objetivo analizar y comparar retrospectivamente la aplicación del Plan Paso a Paso, proponiendo otra forma para la toma de decisiones mediante la utilización de un sistema fuzzy, en la comuna de Valdivia.

Material y Método

Tipo de estudio

Se condujo un estudio descriptivo de corte transversal sobre los valores de los indicadores del Plan Paso a Paso (en adelante, Plan) para la comuna de Valdivia. Se seleccionó esta comuna por la accesibilidad de los datos para el equipo investigador y por concentrar la mayor población de la Región de Los Ríos, confiriendo indicadores más estables y fidedignos.

Recolección de la información

Los datos utilizados, sobre la propagación del COVID-19 en Valdivia, fueron extraídos desde reportes, informes y/o base de datos, de disposición pública^{24,25}. La información de los indicadores del Plan, fue recopilada semanalmente entre el 21 de agosto de 2020 al 29 de enero de 2021.

Análisis de los datos

Se estableció una modelación vía números fuzzy de cada uno de los umbrales de los indicadores del Plan y se determinó, mediante el uso de un

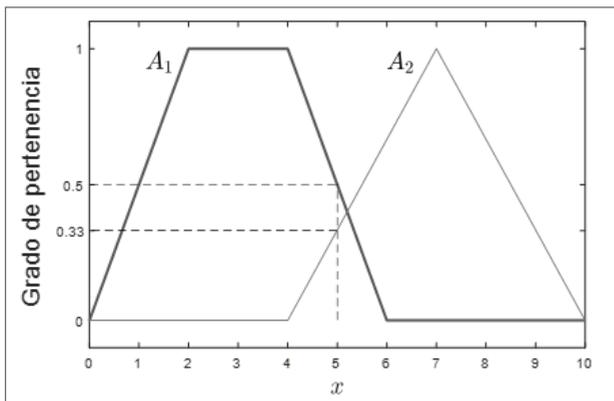


Figura 1. Números fuzzy trapezoidal $A_1=(0; 2; 4; 6)$ y triangular $A_2=(4; 7; 10)$. Además, en línea discontinua, grado de pertenencia para el valor $x = 5$ en ambos conjuntos fuzzy.

SBRF, una respuesta para la fase de confinamiento de la comuna en estudio (una toma de decisión artificial).

Intuitivamente, un conjunto fuzzy es un conjunto cuya frontera (valor límite) es imprecisa, del punto de vista de modelamiento. En Figura 1 se muestra un número fuzzy trapezoidal $A_1 = (0; 2; 4; 6)$ y uno triangular $A_2 = (4; 7; 10)$. Ahí, se visualiza que el valor $x = 5$ pertenece en un grado de 0,5 al conjunto fuzzy A_1 y en un grado de 0,33 al conjunto fuzzy A_2 , respectivamente. Así, se verifica que este valor puede pertenecer, en diferentes grados, a dos conjuntos (más al conjunto A_1 que al conjunto A_2). Lo anterior se extrapola para cada valor a ingresar en los conjuntos fuzzy que modelan a los umbrales de los indicadores del Plan Paso a Paso, esto es, considerar que un valor pueda representar, en diferentes grados, a diferentes fases de confinamiento (no solo a una, rigurosamente).

Un SBRF tiene dos componentes de elaboración (un módulo de fuzzyficación y una base de reglas fuzzy) y dos componentes de respuesta (un método de inferencia fuzzy y un módulo de defuzzyficación)¹⁷.

Se comparó la toma de decisiones efectuada para la comuna de Valdivia, desde el 21 de agosto de 2020 al 29 de enero de 2021, según: a) lo definido por el Plan, b) lo decidido por el MINSAL y c) según el sistema fuzzy (SBRF). Además, se determinó la variación de indicadores epidemiológicos posteriores a 4 hitos históricos influyentes en la movilidad de las personas, como fueron: primer retiro del 10% de los fondos de pensiones, fiestas patrias, plebiscito por la nueva constitución (coincidió con retiro del cordón sanitario regional) y fiestas de fin de año.

Elaboración del sistema fuzzy

En la etapa de modelamiento, para el módulo de fuzzyficación, el conocimiento de expertos en el área juega un papel importante en la construcción de conjuntos fuzzy adecuados para las variables entradas a ser utilizadas^{18,20}. En este trabajo, los valores umbrales de los indicadores del Plan son modelados por una clase particular de conjuntos fuzzy llamados números fuzzy trapezoidal y triangular¹⁷. En Figura 2 se muestran los números fuzzy elaborados para representar la reproductividad efectiva (Re) y la positividad. En el primer caso, en imagen izquierda, se modelan valores de $Re < 1$ (conjunto C_1) y valores $Re > 1$ (conjunto C_2), ya que según Tabla 1, existe un único valor umbral límite ($Re = 1$) para decidir las fases de confinamiento según Plan. Para el segundo caso, en imagen derecha de Figura 2, se modelan los umbrales considerados para porcentajes de positividad menor a 4% (conjunto E_1), entre 4% y 8% (conjunto E_2), entre 8% y 10% (conjunto E_3) y para positividad mayor de 10% (conjunto E_4), o sea, cuatro conjuntos fuzzy para modelar las fases intercaladas entre los tres valores umbrales declarados en Tabla 1. En la imagen izquierda de la Figura 2, la notación para el conjunto fuzzy $C_1 = (0; 0; 0,4; 2)$ describe al indicador de reproductividad efectiva “menor que 1” y posee grado de pertenencia completa (valor $y = 1$ en eje Y) desde el valor $x = 0$ hasta $x = 0,4$ (en eje X) donde comienza a disminuir. El conjunto fuzzy $C_2 = (0,5; 1,3; 4; 4)$, que representa “ $Re > 1$ ” comienza a poseer grados de pertenencia a partir del valor $x = 0,5$ hasta obtener el grado de pertenencia completa a partir del valor $x = 1,3$. Para los conjuntos fuzzy que representan la positividad (imagen derecha) la interpretación es similar a la mencionada. Los

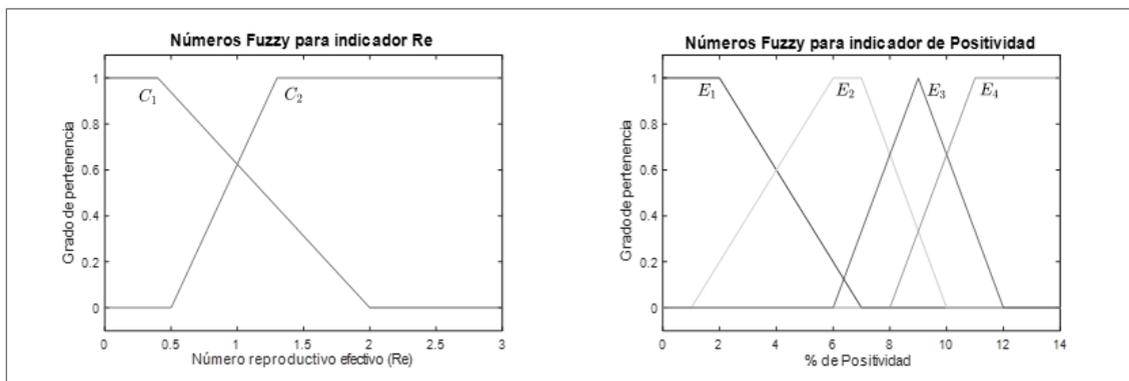


Figura 2. Números fuzzy aplicados al indicador de Reproductividad Efectiva (imagen izquierda) y porcentaje de Positividad (imagen derecha). En imagen izquierda se describen los números fuzzy $C_1 = (0; 0; 0,4; 2)$, para $Re < 1$, y $C_2 = (0,5; 1,3; 4; 4)$, para $Re > 1$. En imagen derecha se describen los números fuzzy $E_1 = (0; 0; 2; 7)$, para positividad menor que 4%, $E_2 = (1; 6; 7; 10)$, para positividad entre 4% y 8%, $E_3 = (6; 9; 9; 12)$, para positividad entre 8% y 10%, y $E_4 = (8; 11; 100; 100)$ para positividad mayor de 10%.

Tabla 2. Valores de indicadores del Plan Paso a Paso para la comuna de Valdivia al 21 de agosto y al 11 de septiembre de 2020

Indicadores	Valores al 21 de agosto de 2020	Valores al 11 de septiembre de 2020
Ocupación UCI Nacional	79,54	82,29
Ocupación UCI Regional	61,90	71,43
Re	0,42	1,32
Tasa casos nuevos (media móvil semanal)	0,97	3,39
Positividad (7 días)	2,1	4,5
Casos aislados desde la notificación de sospecha/probable	100	83
Contactos en cuarentena desde diagnóstico del caso confirmado/probable	84	96
Casos nuevos que vienen de contactos en seguimiento	93,1	59,5
Vigilancia activa en población de riesgo	36,4	33,2

números fuzzy para el resto de los indicadores son elaborados de forma similar. Para la base de reglas, establecemos reglas fuzzy del tipo condicional “Si (estado y/o condición) entonces (acción y/o respuesta)”¹⁷.

Respuesta del sistema fuzzy

Se escogió el método de inferencia fuzzy de Mamdani (que entrega un conjunto fuzzy como respuesta) unido al método de defuzzyficación del centro de masa para establecer una respuesta objetiva (un número real “z”) que es aproximado al valor de fase de confinamiento correspondiente a la comuna estudiada (valores 1, 2, 3 o 4 según la fase de cuarentena, transición, preparación y

apertura inicial, respectivamente). Como ejemplo, Figura 3 muestra la respuesta del sistema fuzzy para dos eventos, según los valores de entrada para los 9 indicadores del Plan (Tabla 2), recolectados en la comuna de Valdivia al finalizar la semana el 21 de agosto y el 11 de septiembre del año 2020, respectivamente. Así, se determina una respuesta fuzzy que genera un área sombreada (un conjunto fuzzy) que interpreta que los valores de entrada activan reglas que, a su vez, pueden representar más de una fase de confinamiento según lo indicado en el Plan. De esta forma, el valor del centro de masa de esa área sombreada (un número real “z”) plantea una respuesta objetiva que considera la ponderación de todos los indicadores del Plan.

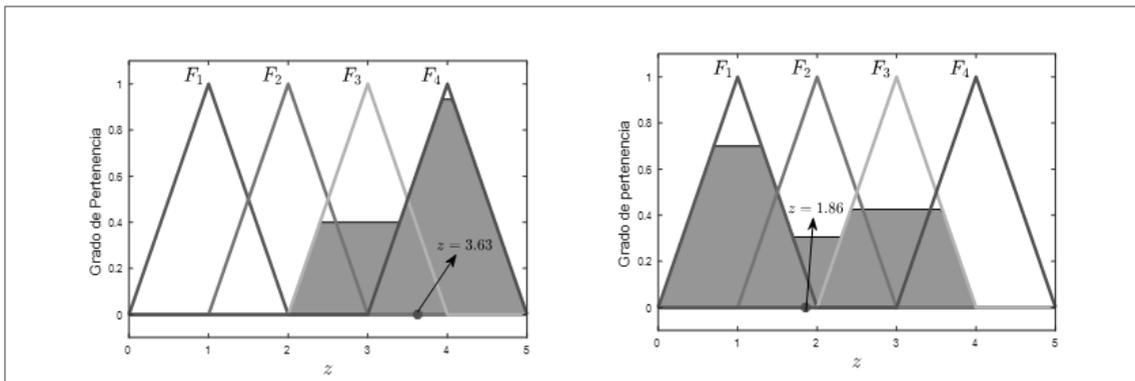


Figura 3. (Izquierda) Respuesta “Fase 4” (según $z = 3,63 \approx 4$) y (Derecha) respuesta “Fase 2” (según $z = 1,86 \approx 2$) del Sistema fuzzy, en ambos casos, para la comuna Valdivia a la semana del 21 de agosto y del 11 de septiembre de 2020, respectivamente. Los números fuzzy $F_1 = (0; 1; 2)$, $F_2 = (1; 2; 3)$, $F_3 = (2; 3; 4)$ y $F_4 = (3; 4; 5)$ modelan las fases de confinamiento para cuarentena, transición, preparación y apertura inicial, respectivamente.

A modo explicativo, en imagen derecha de Figura 3 se visualizan tres áreas sombreadas, para Fases 1, 2 y 3, generadas por la existencia de valores de indicadores que permiten estar, en mayor o menor medida, en las Fases 1, 2 y 3. Así, el sistema fuzzy “pondera” a todos estos indicadores, y confirma la tendencia central de equilibrio entre estas áreas sombreadas, a considerarse para Fase 2, según el resultado final del centro de masa ($z = 1,86 \approx 2$).

La respuesta fuzzy se aplicó una semana posterior a la fecha de corte de datos, dado que, la publicación de éstos demora, en promedio, 4 días (desde la fecha de corte). Asimismo, el cambio de fase para las comunas anunciadas por el MINSAL

es informada con 3 días (aproximadamente) de antelación a su aplicación.

Finalmente, un esquema general del funcionamiento del sistema fuzzy propuesto es presentado en Figura 4. Los valores para el resultado de esta figura son los contemplados en segunda columna de Tabla 2. Ahí verificamos que existen valores para declarar confinamiento a Fase 1 o 2, según $Re = 1,32$ y otros indicadores de trazabilidad, pero, a la vez, valores para declarar Fases 3 o 4 según Tasa de Casos Nuevos, Positividad y Ocupación UCI. Luego, solo por el indicador de reproducción efectiva ($Re > 1$) se debiera retroceder a la fase de cuarentena, según Tabla 1 del Plan. Sin embargo, el cuestionamiento de esta posible y drástica toma

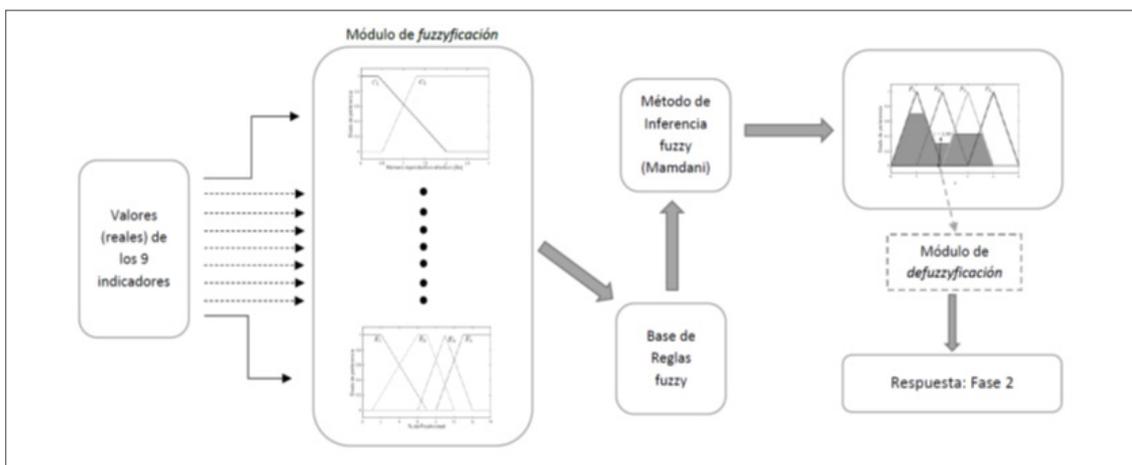


Figura 4. Esquema metodológico de funcionamiento del sistema basado en reglas fuzzy para toma de decisión en la fase de confinamiento según los indicadores del Plan Paso a Paso.

de decisión surge al determinar si es considerable aceptar solo a uno de los indicadores, y no al conjunto de todos ellos, al hecho de retroceder o avanzar de fase. Por tanto, esta propuesta de sistema fuzzy genera, justamente, la adopción de integrar y otorgar una respuesta (para Fase 2, descrita en subsección anterior) que contempla en forma ponderada a todos los indicadores.

Ética en investigación

Al ser información de acceso público, y que no contienen datos sensibles, la investigación no requirió de la revisión por parte de un comité ético científico de investigación.

Resultados

En la determinación para la fase de confinamiento de Valdivia, la oportunidad de la toma de decisiones efectuada por el MINSAL no se condice con lo establecido según los criterios del Plan Paso a Paso. Más aún, desde el 04 de septiembre de 2020 al 29 de enero de 2021, la comuna debió haber estado en la fase de cuarentena, salvo una semana del mes de octubre en donde debió haber

avanzado a la fase de transición, de acuerdo con los criterios del Plan (Figura 5).

En Figura 5, el sistema fuzzy presenta una respuesta intermedia entre lo determinado por el MINSAL y lo que debería haber sido la decisión de acuerdo con lo indicado en el Plan. Así, observamos que el sistema fuzzy se intercala entre una toma de decisión subjetiva, como las aplicadas por el MINSAL, y una toma de decisión de criterio exacto (algorítmico) basado en datos objetivos, como las descritas según lo indicado en el Plan Paso a Paso.

En la Tabla 3 se observan indicadores epidemiológicos posteriores a los cuatro hitos analizados, como la media móvil semanal de casos nuevos, los casos activos y el número de personas fallecidas asociadas al COVID-19. En dos de los cuatro hitos, el MINSAL no aplicó el Plan, generándose consecuencias sanitarias negativas. Dichos hitos correspondieron al primer retiro del 10% de las AFP y las fiestas de fin de año (Tabla 3). Por otra parte, cuando el MINSAL aplicó el Plan se observó la mantención de los indicadores epidemiológicos. Específicamente, asociados a los hitos de fiestas patrias y la votación por nueva Constitución (Tabla 3).

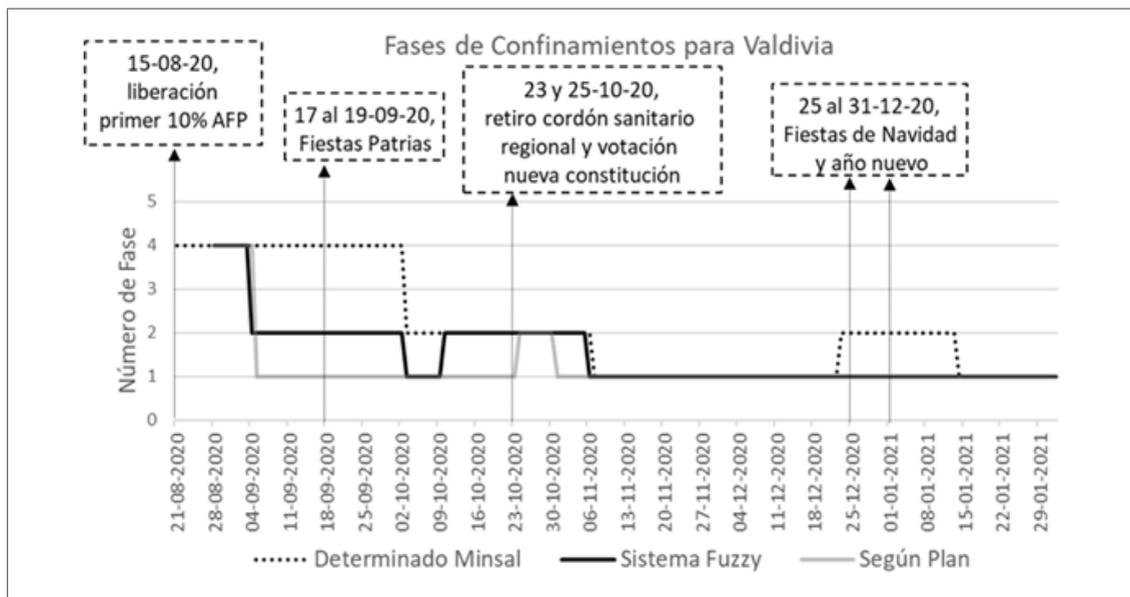


Figura 5. Toma de decisión para determinar fase de confinamiento para la comuna de Valdivia desde el 21 de agosto de 2020 al 29 de enero de 2021. (Punteado) según determinado por MINSAL, (línea negra) según Sistema fuzzy y (línea gris) según indicado en el Plan Paso a Paso.

Tabla 3. Hitos históricos asociados a variaciones significativas de valores en indicadores e interpretación de la decisión tomada para la comuna de Valdivia

Hito histórico	Fecha	Evaluación de indicadores	Consecuencias (en variación de valores epidemiológicos)			Fecha	Interpretación
			Casos Nuevos (media móvil semanal)	Casos Activos	Fallecidos		
Liberación del primer 10% desde AFP	desde el 15-08-2020	al 28-08-2020	+ 83,4%	+ 68,4%	+ 0,0%	del 04 al 11-09-2020	Errado haber mantenido de fase a la comuna
Celebración de Fiestas Patrias	del 17 al 19-09-2020	al 25-09-2020	- 2,4%	+ 3,0%	+ 11,1%	del 02 al 09-10-2020	Correcto haber decidido bajar de fase a la comuna
Retiro cordón sanitario regional y votación nueva Constitución	23 y 25-10-2020	al 30-10-2020	+ 11,3%	+ 20,3%	+ 12,5%	del 06 al 13-11-2020	Correcto haber decidido bajar de fase a la comuna
Celebración de navidad y año nuevo	25 y 31-12-2020	al 18-12-2020	+35,4 %	+ 55,2%	+ 50%	del 25-12-2020 al 08-01-2021	Errado haber decidido subir de fase a la comuna

Discusión

Las aglomeraciones y el aumento de la movilidad de personas favorecen la propagación viral y aumento de casos de COVID-19²⁶⁻³⁰. Considerando que, como en otros países, el Plan fue diseñado para regular la movilidad^{31,32}, es relevante su cumplimiento efectivo sobre todo en relación a hitos, como fiestas tradicionales, que la incrementan³³. Para el caso de la ciudad de Valdivia, el visor del Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería permitió observar aumentos de movilidad en el mes de agosto de 2020 (retiros del 10% de las AFP) y en el mes de diciembre con motivo de los días de fiestas de fin de año³⁴. Lo anterior, coincide con los resultados obtenidos relacionados en que, para dichos hitos, el Plan Paso a Paso no fue aplicado por parte del Ministerio de Salud.

No obstante, se reconoce que la comunicación del riesgo y aplicación de medidas de confinamiento, por parte de la autoridad sanitaria, tienen compleja recepción por parte de la ciudadanía, dado que éstas afectan la vida y las condiciones de

subsistencia de las personas dentro de un complejo escenario socio-comunitario y territorial^{35,36}. Por lo anterior, resulta relevante que la toma de decisiones pueda ser facilitada a través de un sistema de apoyo. Así, como en otros trabajos^{37,38}, esta investigación mostró que el uso de herramientas tecnológicas, como un sistema fuzzy, permite manejar y analizar múltiples indicadores epidemiológicos y establecer una respuesta basada en inteligencia artificial, para el auxilio en la toma de decisiones sobre confinamiento en múltiples territorios. Así, una idea fundamental en este trabajo es ponderar de manera suavizada, no drástica, a los valores de indicadores cercanos a estos umbrales críticos de frontera, donde se generaría el retroceso u avance de fase según lo indicado en el Plan.

Si bien el sistema fuzzy no se aplicó para la toma de decisión con respecto a las fases del Plan, sus respuestas fueron previsoras positivamente cuando la toma de decisión del MINSAL fue coincidente en tendencia con el sistema fuzzy (posterior a fiestas patrias y nueva Constitución). Por el contrario, sus respuestas fueron previsoras

negativamente cuando la toma de decisión del MINSAL no fue coincidente en tendencia con el sistema fuzzy (posterior a retiro del 10% de AFP y fiestas de fin de año).

Sin embargo, entendiendo las limitaciones inherentes a cualquier modelamiento, como la disponibilidad de datos públicos oportunos, asumimos que el sistema fuzzy propuesto puede ser perfeccionado a futuro en su diseño, optimizando la selección y/o ponderación de las variables más influyentes, para anticiparse de mejor manera a la toma de decisiones frente a un fenómeno epidemiológico complejo.

Por otra parte, si bien los desarrollos de este trabajo fueron considerados para una particular comuna de Chile, al estar el Plan estandarizado para todo el país, nuestros análisis resultan pertinentes. Por tanto, una vez que el sistema fuzzy propuesto modela los criterios del Plan, éste podría ser considerado a ser aplicado en cualquier comuna de Chile, tomando decisiones más asertivas, especialmente, frente a eventos de gran movilidad y comunes a toda la nación (como los hitos seleccionados).

Finalmente, reconociendo que el Plan ha sido un valioso esfuerzo realizado para estandarizar medidas de confinamiento y entendiendo que la decisión de las autoridades responde a diversas variables, el contar con un sistema de inteligencia artificial, probadamente más flexible, imparcial y objetivo a través del análisis retrospectivo, puede contribuir a que la toma de decisiones se transparente de mejor manera a la población, contribuyendo a la gobernanza de la emergencia y a la comunicación del riesgo. Desde un enfoque promocional de la salud, nuestra propuesta pretende contribuir también a la revitalización del ejercicio consciente por parte de la ciudadanía del autocuidado personal y colectivo, tolerando de mejor manera las restricciones a su movilidad.

Referencias

1. Organización Mundial de la Salud. Statement on the second meeting of the International Health Regulations (2005) Emergency Committee regarding the outbreak of novel coronavirus (2019-nCoV). 2020.
2. Organización Mundial de la Salud. WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020 [Internet]. 2020 [cited 2021 Feb 28]. Available from: <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--11-march-2020>.
3. Gensini G F, Yacoub M H, Conti AA. The concept of quarantine in history: from plague to SARS. *J Infect.* 2004; 49: 257-61.
4. Flaxman S, Mishra S, Gandy A, Unwin HJT, Mellan TA, Coupland H, et al. Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe. *Nature.* 2020; 584: 257-61.
5. Chowdhury R, Luhar S, Khan N, Choudhury SR, Matin I, Franco OH. Long-term strategies to control COVID-19 in low and middle-income countries: an options overview of community-based, non-pharmacological interventions. *Eur J Epidemiol.* 2020; 35: 743-8.
6. Larrosa LM. SARS-CoV-2 in Argentina: Lockdown, mobility, and contagion. *J Med Virol.* 2021;93:2252-61.
7. Silva L, Filho DF, Fernandes A. The effect of lockdown on the COVID-19 epidemic in Brazil: Evidence from an interrupted time series design. *Cad Saude Publica.* 2020;36(10):e00213920.
8. Koh D. COVID-19 lockdowns throughout the world. *Occup Med (Chic Ill).* 2020; 70(5): 322.
9. Góis Aédson N, Laureano Estevão E, Santos David da Silva, Sánchez DE, Souza LF VR de CA, et al. Lockdown as an Intervention Measure to Mitigate the Spread of COVID-19: a modeling study. *Rev Soc Bras Med Trop.* 2020;53:e20200417.
10. Bennett M. All things equal? Heterogeneity in policy effectiveness against COVID-19 spread in Chile. *World Dev.* 2021; 137: 105208.
11. Harari Y. *Homo Deus. A brief history of tomorrow.* Penguin Random House; 2016.
12. Subudhi S, Verma A, Patel AB. Prognostic machine learning models for COVID-19 to facilitate decision making. *Int J Clin Pract.* 2020; 74(12): e13685.
13. Elaziz M A, Hosny K M, Salah A, Darwish M M, Lu S, Sahlol AT. New machine learning method for image-based diagnosis of COVID-19. *PLoS One.* 2020; 15(6): e0235187.
14. Pourhomayoun M, Shakibi M. Predicting mortality risk in patients with COVID-19 using machine learning to help medical decision-making. *Smart Heal.* 2021; 20: 100178.
15. Arga KY. COVID-19 and the Futures of Machine Learning. *Omi a J Integr Biol.* 2020; 24(9): 512-4.
16. Alimadadi A, Aryal S, Manandhar I, Munroe P B, Joe B, Cheng X. Artificial intelligence and machine learning to fight COVID-19. *Physiol Genomics.* 2020; 52: 200-2.
17. Barros L C, Bassanezi R C, Lodwick W. *A First Course*

- in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics. Heidelberg: Springer; 2017.
18. de Paula Castanho MJ, de Barros LC, Yamakami A, Vendite LL. Fuzzy expert system: An example in prostate cancer. *Appl Math Comput.* 2008; 202(1): 78-85.
 19. Zolnoori M, Fazel Zarandi MH, Moin M, Taherian M. Fuzzy rule-based expert system for evaluating level of asthma control. *J Med Syst.* 2012; 36: 2947-58.
 20. Jafelice RM, De Barros LC, Bassanezi RC, Gomide F. Fuzzy modeling in symptomatic HIV virus infected population. *Bull Math Biol.* 2004; 66: 1597-620.
 21. Sánchez D E, Esmi E, de Barros LC. Discrete and continuous logistic p-fuzzy models. In: *International Fuzzy Systems Association World Congress.* Springer, Cham; 2019. p. 556-66.
 22. Ghosh B, Biswas A. Status evaluation of provinces affected by COVID-19: A qualitative assessment using fuzzy system. *Appl Soft Comput.* 2021; 107540.
 23. Stiegelmeier E W, Bressan GM. A fuzzy approach in the study of COVID-19 pandemic in Brazil. *Res Biomed Eng.* 2021; 37(2): 263-71.
 24. Ministerio de Salud. Cifras Oficiales COVID-19 [Internet]. [cited 2021 Feb 25]. Available from: <https://www.gob.cl/coronavirus/cifrasoficiales/>
 25. Secretaría Regional Ministerial de Salud de la región de Los Ríos. Noticias COVID-19 Región de Los Ríos [Internet]. 2021 [cited 2021 Feb 25]. Available from: <https://seremi14.redsalud.gob.cl/category/covid-19/>
 26. Nouvellet P, Bhatia S, Cori A, Ainslie K E C, Baguelin M, Bhatt S, et al. Reduction in mobility and COVID-19 transmission. *Nat Commun.* 2021; 12(1090).
 27. Cancino S, De la Fuente H, Victoriano R, Astroza S, Covarrubias J, Durán M, et al. Analisis de movilidad durante la pandemia de COVID-19 en las regiones del Biobío y Ñuble utilizando datos de telefonos móviles. *Rev Ing Sist.* 2020; 34: 79-97.
 28. Carranza A, Goic M, Lara E, Olivares M, Weintraub, G. I, Covarrubia J, et al. The Social Divide of Social Distancing: Shelter-in-Place Behavior in Santiago During the Covid-19 Pandemic. *Manage Sci.* 2022; 68(3): 2016-27.
 29. Fang H, Wang L., Yang Y. Human mobility restrictions and the spread of the Novel Coronavirus (2019-nCoV) in China. *J Public Econ.* 2020; 191.
 30. Hsiang S, Allen D, Annan-Phan S, Bell K, Bolliger I, Chong T, et al. The effect of large-scale anti-contagion policies on the COVID-19 pandemic. *Nature [Internet].* 2020;584(7820):262-7. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2404-8>.
 31. Silva C J, Cruz C, Torres D F M, Muñuzuri A P, Carballosa A, Area I, et al. Optimal control of the COVID-19 pandemic: controlled sanitary deconfinement in Portugal. *Sci Rep.* 2021; 11(3451).
 32. Angeli F, Montefusco A. Sensemaking and learning during the COVID-19 pandemic: A complex adaptive systems perspective on policy decision-making. *World Dev.* 2020; 136: 105-6.
 33. Boccia S. Christmas Festivities and COVID-19: A Foreseeable Risk to Anticipate. *Front Public Heal.* 2021; 8(639647).
 34. Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería. CovidAnalytics [Internet]. [cited 2022 May 27]. Available from: <https://covidanalytics.isci.cl/>
 35. Canals M CC, Canals A, Yohannessen K L LA, Bertoglia MP, Eguiguren P, Siches I, et al. Epidemic trends, public health response and health system capacity: the Chilean experience in four months of the COVID-19 pandemic. *Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Heal Rev Panam Salud Publica.* 2020; 44.
 36. Tariq A, Undurraga EA, Laborde CC, Vogt-Geisse K, Luo R, Rothenberg R, et al. Transmission dynamics and control of COVID-19 in Chile, March-October, 2020. *PLoS Negl Trop Dis.* 2021; 15(1): e0009070.
 37. Ocampo L, Yamagishi K. Modeling the lockdown relaxation protocols of the Philippine government in response to the COVID-19 pandemic: An intuitionistic fuzzy DEMATEL analysis. *Socioecon Plann Sci.* 2020; 72(100911).
 38. Sharma M K, Vandana N D, Mishra V. Mediative fuzzy logic mathematical model: A contradictory management prediction in COVID-19 pandemic. *Appl Soft Comput urnal.* 2021; 105(107285).