



## **Análisis espacial de evaluación multicriterio con la lógica fuzzy y sistemas de información geográfica aplicado a la vulnerabilidad global en el departamento Pocito (San Juan-Argentina)**

*Spatial analysis of multicriteria evaluation with fuzzy logic and geographic information systems applied to global vulnerability in the Pocito department (San Juan-Argentina)*

**Narváez, Luciana M.**

Departamento de Geografía. Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes. Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). [lucinarvaez11@gmail.com](mailto:lucinarvaez11@gmail.com)

### RESUMEN

**Palabras Claves:**

Amenazas  
Riesgo  
Mapa  
Análisis de sensibilidad

El departamento Pocito, se encuentra afectado por diferentes amenazas de origen natural. Pero el grado de impacto de estos fenómenos peligrosos está en función de la vulnerabilidad, por lo que se considera de suma importancia evaluar su distribución espacial. En este sentido, el objetivo del trabajo consiste en determinar áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad global. La metodología empleada consiste en la integración de la evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica, donde la conjunción de ambas técnicas es potencialmente valiosa para el análisis espacial. Complementando dicha técnica con el análisis de sensibilidad explícitamente espacial, como uno de los varios soportes para la importante etapa de la validación de los resultados propuesto como modelo decisional. Los resultados obtenidos representan en un mapa las áreas de alta vulnerabilidad que deben ser consideradas para generar políticas de prevención y mitigación del riesgo. Se destacan como áreas vulnerables la zona Este del departamento y próximo al centro de Pocito en donde se encuentran asentamientos precarios. Por otro lado, el análisis de sensibilidad determinó un conjunto de criterios que son significativos y robustos en el modelo de vulnerabilidad. Con esta metodología planteada se pretende avanzar en la reducción de la probabilidad de tomar una decisión incorrecta reduciendo el riesgo de una resolución, mediante la disminución de la incertidumbre de la base de datos y la vacilación de la regla de decisión.

### ABSTRACT

**Keywords:**

Threats  
Risk  
Map  
Sensitivity analysis

The Pocito department is affected by different threats of natural origin. But the degree of impact of these dangerous phenomena is a function of vulnerability, so it is considered of utmost importance to evaluate their spatial distribution. In this sense, the objective of the work is to determine areas with different levels of global vulnerability. The methodology used consists of the integration of the multicriteria evaluation and the geographic information system, where the combination of both techniques is potentially valuable for spatial analysis. Complementing this technique with the explicitly spatial sensitivity analysis, as one of the various supports for the important stage of the validation of the results proposed as a decisional model. The results obtained represent on a map the areas of high vulnerability that must be considered to generate risk prevention and mitigation policies. The eastern part of the department and near the center of Pocito, where precarious settlements are found, stand out as vulnerable areas. On the other hand, the sensitivity analysis determined a set of criteria that are significant and robust in the vulnerability model. With this proposed methodology, it is intended to advance in reducing the probability of making an incorrect decision by reducing the risk of a resolution, by reducing the uncertainty of the database and the hesitation of the decision rule.

Recibido: 26/05/2021

Aceptado: 17/11/2021

## 1. Introducción

La noción de vulnerabilidad utilizada en el campo de los riesgos tiene una historia de más de 70 años. Durante estas últimas décadas, ideas y nociones sobre su concepto y sobre el desarrollo de metodologías y contextualizaciones de la denominada vulnerabilidad han experimentado varias transformaciones y adelantos. La evolución del concepto ha sido esencial en la revalorización y reestructuración del problema de riesgo, permitiendo el surgimiento de enfoques paradigmáticos. De forma creciente, los nuevos enfoques enfatizan en las causas sociales de los riesgos. Todo esto, en contraposición al tradicional énfasis en los aspectos físicos asociados a los llamados peligros naturales. La vulnerabilidad, con referencia a la temática de los riesgos, puede, en una primera aproximación, ser definida como la predisposición o susceptibilidad de la sociedad, sus medios productivos e infraestructuras de sufrir daños y pérdidas cuando son impactados por un peligro, y de manifestar dificultades para recuperarse posteriormente. A partir de los años 80 y en especial en los años 90 este enfoque conceptual de los riesgos fue ampliamente aceptado y difundido, donde el uso de la palabra vulnerabilidad se generalizó posteriormente.

*Sin dejar de reconocer la importancia en la valoración del riesgo de los fenómenos naturales, es decir la amenaza, en este enfoque otros aspectos entraron a jugar un papel igualmente importante que podrían ser afectados y sus características. Un sismo en un desierto o un huracán en el centro del océano, desde esta perspectiva, no pueden significar un peligro al no haber nadie expuesto o que pueda ser afectado, es decir no significan riesgo para nadie en términos pragmáticos. (Cardona, 2001, p.8).*

En el caso de la Geografía de los Riesgos, la vulnerabilidad se estudia respondiendo a qué peligro o amenaza se enfocará, ya que si no hay peligro no es posible ser vulnerable a los daños que significa la ocurrencia de un desastre. Como también, si no existe población que pueda ser afectada por la ocurrencia de un fenómeno natural, no hay peligro. En este trabajo se enfocará la vulnerabilidad frente a la amenaza sísmica, amenaza de licuefacción y amenaza de aluviones en el departamento Pocito. El objetivo es diferenciar áreas de vulnerabilidad global.

Los riesgos ambientales que afectan al departamento Pocito han sido estudiados por diversos especialistas (ingenieros, arquitectos, geógrafos). Entre otros autores se destacan los trabajos realizados por [Nacif \(2011\)](#), [Guzzo \(2009\)](#) y [Narváez \(2020\)](#), enfocados principalmente en la evaluación del riesgo sísmico y riesgo aluvional.

En coincidencia con los autores citados se puede definir la vulnerabilidad como la combinación de procesos físicos, sociales, económicos, educativos, ambientales, políticos, etc. que condicionan la susceptibilidad de la población para adaptarse (anticipar, resistir y recuperarse) a la ocurrencia del peligro con una magnitud que provoque daños. Es decir, que la cantidad de daños que puede provocar un evento peligroso está directamente relacionada con el grado de exposición que posea y con la situación socioeconómica y cultural de la comunidad expuesta.

De acuerdo con [Aneas et al. \(2011\)](#) se puede reconocer que una población tiene una vulnerabilidad global, cuando poseen un conjunto de características que constituyen un común denominador para sufrir daños ante la presencia de cualquier peligro ambiental, es decir, no depende del fenómeno al que se refiere sino del contexto sociocultural en el que se produce, por lo que se está en presencia de una vulnerabilidad estructural.

El concepto de vulnerabilidad tiene un carácter multi-causal al incluir diferentes procesos, siguiendo a [Wilches \(1993\)](#) propone que la vulnerabilidad no es lineal, siendo necesario considerar que la vulnerabilidad en si misma constituye un sistema dinámico, es decir, surge como consecuencia de la interacción de una serie de características que convergen en una comunidad. A tal efecto, se divide la vulnerabilidad en distintas dimensiones o ángulos, no sin advertir expresamente que cada una de ellas constituye una dimensión particular del conjunto. En este caso para analizar la vulnerabilidad se escogieron las siguientes dimensiones: peso poblacional, habitacional, humana, económica, educativa, social e instalaciones vitales.

Muchos autores se han concentrado en el desarrollo de metodologías de medición, con el fin de proveer a los planificadores e instituciones políticas y a las poblaciones una herramienta predictiva de escenarios de impactos futuros y, a la vez, un medio para identificar áreas necesarias de intervención, según los niveles de vulnerabilidad delimitados. Aun así, no se ha desarrollado una única metodología para evaluar la vulnerabilidad, y en este trabajo se propone la aplicación de la técnica de evaluación multicriterio (EMC) enmarcado en el paradigma de la decisión multicriterio con enfoque de la teoría de la decisión. Esta técnica opera sobre el dato temático y unido a los sistemas de información geográfica (SIG) se potencia la operación del dato geográfico, logrando un modelo decisional de vulnerabilidad mediante

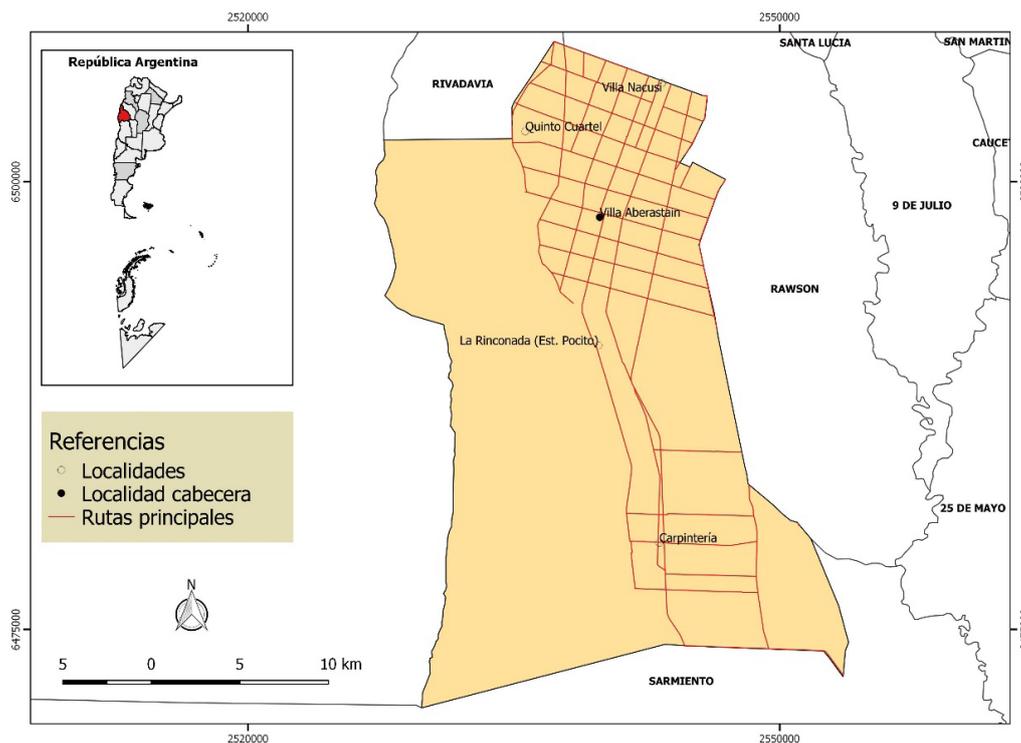
el análisis espacial. A su vez la EMC ofrece diferentes técnicas para la generación de modelos, adoptando en este estudio el método de combinación lineal ponderada (WLC) con estandarización fuzzy. Por otro lado, se adopta el método de análisis de sensibilidad explícitamente espacial para la importante etapa de validación del modelo espacial elaborado y resultando de esta manera más confiable el método de EMC. Basado en el uso de técnicas estadísticas en un SIG y el método *one factor at a time* (OAT).

El riesgo ambiental es considerado una construcción social y con manifestación continua, entonces para reducirlo, las políticas gubernamentales no deben estar dirigidas después del desastre, sino preferentemente apuntar hacia las acciones de prevención. Por esto, la idea central de este trabajo, es el aporte de una cartografía que represente la distribución espacial de la vulnerabilidad, siendo el primer paso para intervenir en las áreas más vulnerables y que necesiten una pronta formulación de estrategia de mitigación.

### 1.1. Área de estudio

El departamento Pocito está localizado (Figura 1) en el sector centro-oeste del valle de Tulúm aproximadamente a 17 km al sur de la ciudad de San Juan. Se encuentra conformado por tres unidades geomorfológicas claramente delimitadas correspondiente a la sierra Chica de Zonda que forma parte de precordillera, la bajada pedemontana de dicha sierra conformada por abanicos aluviales, pedimentos y/o glacis y la depresión del valle compuesto con niveles sedimentarios del abanico aluvial del río San Juan. La precordillera se encuentra al Oeste recorriendo el departamento en el sentido Norte - Sur y en el mismo sentido, pero del lado centro y Este se desarrollan los asentamientos urbanos y actividades económicas.

Figura 1. Localización del departamento Pocito.



Fuente: elaborado en base al Atlas socioeconómico de San Juan, 2016. Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA). UNSJ-FI. Instituto Geográfico Nacional.

Con respecto a las características poblacionales, según el último censo realizado en octubre del 2010, Pocito tiene una población de 53.464 habitantes, lo que representa un peso poblacional de 7,89 % en relación al total provincial, concentrando Villa Aberastain, cabecera departamental, aproximadamente 19.089 habitantes. La segunda localidad más poblada es Villa Nacusi y Villa Barboza de aproximadamente 17.852 habitantes. La densidad de población de San Juan es de 8,4 hab/km<sup>2</sup> y la de Pocito está por encima con 103,8 hab/km<sup>2</sup>. Las mayores densidades de población se concentran en la zona norte de Pocito en las localidades de Villa Nacusi y Villa Barboza y en la cabecera departamental.

El departamento Pocito de acuerdo con el estudio del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) se localiza en una zona de amenaza sísmica muy alta. El estudio de la Microzonificación Sísmica

el Valle de Tulúm (1982), identifica que en el departamento lo atraviesa de falle de La Rinconada. Según el registro sismológico el 11 de junio de 1952 esta falla produjo un sismo de magnitud 7. Para ese entonces la ciudad estaba reconstruida siguiendo la prescripción del Código de Edificación lo que hizo que la intensidad disminuyera a VIII. Las destrucciones se registraron en aquellas viviendas que resistieron al terremoto de 1944, mientras las que adoptaron el Código no sufrieron daños. Por otro lado, la presencia de suelos arenosos, niveles freáticos altos, entre otras condiciones en la zona Este del departamento, es considerado por el INPRES como de licuefacción alta. Según el registro histórico, el terremoto de 1977 destruyó en Pocito gran parte de las edificaciones de adobe y aquellas construidas bajo el Código de Edificación se produjeron fallas de los cimientos debido a la licuefacción.

El departamento Pocito también se encuentra localizado en una zona con amenaza aluvional alta. Las crecientes que impactaron en los últimos años fueron de gran magnitud que ocasionaron inundación en las calles, derrumbes de viviendas, localidades incomunicadas, daño en la red de riego y distribución del agua potable. Entre los registros se destacan las lluvias torrenciales que superaron los 50 mm en 1944. Los días 26 y 27 de diciembre de 1999 se produjo un temporal de viento y lluvia que superó los 40 mm en Pocito. El 8 de marzo del 2003 producto de una precipitación de 20 mm en un lapso de aproximadamente 2 horas, generó aluviones que superaron las defensas.

## 2. Materiales y métodos

“Los sistemas de información geográfica han servido tradicionalmente para realizar modelaciones de la realidad, pero presentan carencias en la resolución de problemas espaciales complejos en el entorno del análisis espacial” (Narváez, 2020, p.100). Como solución a este hecho, surge la posibilidad de integrar los SIG con técnicas de ayuda a la decisión, como las de evaluación multicriterio (EMC), incrementándose así la potencia operativa de los SIG en determinados procesos de planificación y gestión. “La evaluación multicriterio puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones” (Barredo, 1996, p.46).

En el campo de la decisión territorial, donde debemos tomar en cuenta con especial interés el componente espacial de los datos, los procedimientos de EMC no muestran un desarrollo destacable. Esto es debido a que los procedimientos de EMC no han sido pensados para trabajar con datos geográficos, de igual manera que la alta especialización que muestran los paquetes de SIG en cuanto al análisis de la componente espacial de dato geográfico ha dejado rezagadas en esta evolución a algunos procedimientos de análisis que permiten un adecuado tratamiento de la componente temática, al menos en el campo de la toma de decisiones. “La integración de estos dos elementos (SIG y EMC) permitiría llevar a cabo procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los dos componentes del dato geográfico, espacial y temático, proporcionando soluciones a problemas espaciales complejos” (Barredo, 1996, p.38).

La aplicación del paradigma decisional multicriterio en la gestión del riesgo presenta una interesante vía metodológica al tratamiento de esta problemática ambiental. El territorio como un sistema complejo, donde presenta múltiples intervenciones de variables de carácter natural y humano y que a su vez la mutua interacción genera desequilibrios ambientales, ha encontrado en la metodología de la EMC un modelo de gran operatividad.

### 2.1. Etapas metodológicas

- Etapa 1. Diseño, selección y generación de los criterios (factores) que conformaran la Geodatabase de análisis.

En función del objetivo general propuesto, se seleccionarán los criterios. “Un criterio es cierta base para la toma de decisión, que puede ser medida y evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión” (Eastman, *et al.*, 1993 citado en Barredo, 1996, p.59). Los criterios que se utilizarán en este trabajo son de tipo factor. “Un factor es un criterio que realza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste por lo tanto debe ser medido en una escala continua” (Eastman, *et al.*, 1993 citado en Barredo, 1996, p.59). Ejemplo de la evaluación de la resiliencia de la población frente a un sismo, podríamos establecer como un criterio en que la población asentada en zonas más próxima a un hospital puede recibir atención en forma más inmediata que la población de zonas alejadas. Según este factor de proximidad a un hospital, la población más resiliente es la que se encuentra más cerca de un centro hospitalario.

A partir de los datos de cada uno de los criterios se conformará la base de datos geográfica con capas temáticas en formato shape (SHP.) y posteriormente se transforman en modelo raster (100 m de

resolución) para poder aplicar la EMC en un software SIG.

- Etapa 2. Análisis de correlación.

Uno de los principios de EMC establece que el conjunto de criterios a ser incluidos para evaluar un determinado estudio debe ser completo, es decir abarcando todas las dimensiones del fenómeno o hecho en cuestión; por otro lado; mínimo; y no redundante, esto es, que no se incluyan criterios que estén aportando repetidamente la misma información.

Así, para evitar el problema de la redundancia, todos los criterios son sometidos a un análisis de correlación, en este caso se aplicó la técnica paramétrica de Producto Momento o Pearson (Ecuación 1). Se consideran los valores de  $r > 0.50$  capas correlacionadas midiendo el mismo problema de la vulnerabilidad. El análisis de correlación entre pares de criterios, evalúa el grado de asociación entre los mismos mediante el coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

**Ecuación 1:** Coeficiente de Correlación de Pearson.

Donde:

$\sigma_{XY}$  = covarianza de (X,Y),

$\sigma_X$  = Desviación típica en la variable X,

$\sigma_Y$  = Desviación típica en la variable Y.

- Etapa 3. Técnicas para la asignación de pesos a los criterios.

Si bien es frecuente la asignación de pesos a los criterios, no existe un método generalmente aceptado para su determinación. En este trabajo se optó por la aplicación del método de jerarquías analíticas (MJA) propuesto por Saaty (1980) para la asignación de los pesos, que ofrece asimismo una medida cuantitativa de la consistencia entre las relaciones que se establecen entre cada par de criterios para la asignación de tales pesos.

El MJA comienza con establecer la matriz cuadrada de comparación por pares de criterios o variables, que contiene el número de fila y de columnas determinadas por el número de criterio a ponderar, en donde se compara la importancia de uno sobre cada uno de los demás. Por otra parte, cabe desatacar que en este procedimiento la matriz que se produce es recíproca, es decir, los valores asignados a ambos lados de la diagonal son inversos.

La escala de medida establecida para la asignación de los pesos de valor, es una escala de tipo continua que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Tabla 1), definida por Saaty (1980), respectivamente, como extremadamente menos importante (1/9) hasta extremadamente más importante (9), indicando el valor 1 igualdad en la importancia entre pares de criterios; esta escala se presenta seguidamente:

**Tabla 1.** Escala para la asignación de pesos.

Intensidad	Definición
1	De igual importancia
3	Moderada importancia
5	Importancia fuerte
7	Muy fuerte o demostrada
9	Extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

Fuente: escala fundamental de preferencia (Saaty, 1980).

Una vez establecidos los juicios de valor en la matriz, el procedimiento concierne ahora al cálculo del eigenvector principal de la matriz que contiene la serie de pesos ( $w_j$ ), el cual representa el orden de prioridad de los criterios, mientras que el eigenvalor máximo ( $\lambda_{MAX}$ ) de la matriz es una medida de la consistencia de los juicios ( $cr$ ).

Cuando los valores de la razón de consistencia mayores o iguales a 0,10 los juicios de valor deben ser revisados ya que son subjetivos del analista, y no siendo lo suficientemente consistentes para establecer

los pesos ( $w_j$ ); si, por el contrario, es inferior a 0,10 podemos considerar satisfactorios los juicios de valor asignados.

- Etapa 4. Procesamiento de los datos mediante el método de EMC. Modelo decisional.

Como paso previo a la aplicación del método de combinación lineal ponderada, es necesario generar una estandarización continua y difusa (fuzzy) de cada uno de los factores para obtener mapas compensables. La lógica fuzzy es la que permite obtener mapas de vulnerabilidad continuos para cada factor, en donde cada localización se clasifica en cuanto al nivel que tiene entre los extremos vulnerable-no vulnerables. Acá los valores continuos se consideran variaciones en la vulnerabilidad, es decir, todos tienen vulnerabilidad, pero no la misma, llevando los valores entre 0 y 1 o entre 0 y 255. Con funciones de crecimiento o decrecimiento con la distancia.

Los factores que tienen valores continuos son representados como conjuntos difusos a través de funciones de pertenencia difusas. La definición fuzzy implica contar con un buen conocimiento acerca del comportamiento de cada variable en cuanto a su alcance espacial, pues este es el que permite elegir la función que mejor lo representa. En este trabajo se utilizaron las siguientes funciones de crecimiento o decrecimiento: funciones lineales, sigmoideas, y en forma de J.

“En cada factor estandarizado se procede a la asignación de los pesos y a la multiplicación de las correspondientes alternativas, permitiendo acceder seguidamente al procedimiento de suma lineal ponderada como procedimiento de EMC” (Barredo, 1996, p.55). La ecuación es la siguiente (Ecuación 2):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

Ecuación 2.

$r_i$  = modelo decisional o mapa de vulnerabilidad global,

$w_j$  = peso del criterio j,

$x_{ij}$  = valor de la alternativa i en el criterio j.

“Siendo asignado un valor a cada alternativa, representadas en este caso por los objetos espaciales contenidos en las capas temáticas que representan los criterios” (Barredo, 1996, p.58), se puede establecer las áreas más vulnerables frente a las amenazas a través de las alternativas que hayan obtenido los valores de vulnerabilidad ( $r_i$ ) más altos.

La técnica compensatoria como la combinación lineal ponderada (WLC), se basa en la suposición de que un valor alto en una alternativa (celda) en un criterio puede compensar un valor bajo en la misma alternativa en otro criterio. Por ello, en el triángulo de decisiones estratégicas (TDE) la WLC lleva la solución al extremo superior como máxima compensación y riesgo medio de equivocarse en la decisión.

- Etapa 5. Validación de los resultados. Análisis de sensibilidad explícitamente espacial.

El análisis de sensibilidad (AS) explícitamente espacial, entre tantas técnicas que comprende la etapa de validación, aplicado en modelos decisionales de riesgos ambientales es imprescindible para dar robustez y credibilidad a los resultados obtenidos. Dicho análisis, comúnmente, se basa en la introducción de pequeñas variaciones en los parámetros de los modelos con el objetivo de determinar si éstas influyen significativamente en el resultado del mismo, dejando al margen del análisis la referencia espacial. Ante esto, en este trabajo la aplicación de AS explícitamente espacial, se llevará a cabo utilizando las herramientas disponibles en un sistema de información geográfica y aplicándola al mapa de vulnerabilidad global en el departamento Pocito.

Para comprobar la validez del modelo de la sumatoria lineal ponderada como técnica de evaluación multicriterio, se realiza mediante la implementación de la variación en un  $\pm 25\%$  del valor a nivel de pixel (100 metros de resolución) de los factores y pesos utilizados en el modelo. Dicho modelo se tomó como referencia para hacer el AS intentando reproducir, en la medida de lo posible, el procedimiento *One at a Time Factor* (OAT). Así, se pretende obtener el impacto local de los factores en el modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada y sus pesos, mientras los demás permanecen invariables. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad los modelos finales fue necesario reclasificarlos en mapas binarios, con la finalidad de obtener la mayor información posible sobre el impacto de los factores y pesos modificados en los resultados del modelo, así como para determinar el grado de robustez del modelo planteado. Para verificar el nivel de acuerdo que presentaban cada uno con respecto

a los obtenidos en el modelo con los factores y pesos originales, se cuantifico con el estadístico Kappa y estadístico Pearson (Tabla 2) considerando la clasificación propuesta por Landis & Koch (1977) citado en Plata (2010).

**Tabla 2.** Escala de valoración del Índice.

Clasificación	Acuerdo	Desacuerdo AS
1 – 0.81	Casi perfecto	No significativo
0.80 – 0.61	Sustancial	Mediano (menor)
0.60 – 0.41	Moderado	Moderado
0.40 – 0.21	Mediano	Sustancial
0.20 – 0	Insignificante	Casi total

Fuente: elaboró Landis y Koch, (1977) citado el Plata (2010).

### 3. Desarrollo metodológico y resultados

A continuación, se explican las dimensiones con sus respectivos criterios seleccionados y la aplicación de una de las técnicas de EMC-SIG para obtener el mapa de vulnerabilidad global.

Dimensión del peso poblacional: “los daños que pueda ocasionar un desastre serán mayores en las áreas de mayor concentración poblacional” (Aneas, *et al.*, 2011 p.102). El riesgo existe donde se encuentra población que puede haberse afectada por el desenlace de la amenaza, siguiendo esta concepción, la presencia de los espacios densamente poblados, por definición, son más vulnerables que aquellos en los que vive menos población y de forma más dispersa; y además dificultan la movilización por el traslado de personas. Sin embargo, estas condiciones de vulnerabilidad dependen de las características que posee la población expuesta (educativos, económicos, culturales, etc). Criterios considerados:

- Densidad de población: cantidad de habitantes por km<sup>2</sup> de superficie.
- Superficie construida: definida como el área que cubre las edificaciones en m<sup>2</sup> en relación a la superficie total de referencia.

Cuando los datos están disponibles se puede estimar la densidad ocupacional en diferentes tipos de edificaciones como residenciales, comerciales, institucionales, etc., para el día o la noche o para algún día específico de la semana, puesto que la ocupación varía y también el impacto de un evento sobre la población.

Dimensión habitacional: se define como la capacidad que poseen las estructuras físicas para absorber los efectos de un evento. Los materiales de construcción de las viviendas adquieren relevancia frente a situaciones tales como eventos sísmicos, particularmente las paredes de estas, puesto que dejan en evidencia la vulnerabilidad frente a estos eventos. Para su determinación se seleccionaron los siguientes criterios:

- Edificaciones precarias.
- Edificaciones precarias regular.

Los criterios anteriores se refieren a que las edificaciones no son sismorresistentes y las categorizadas como precarias regular presentan peores condiciones o se encuentran en un estado peor o más grave que las clasificadas como de edificaciones precarias solamente.

Dimensión humana: “esta dimensión hace referencia a las características de cada individuo que condicionan su vulnerabilidad” (Aneas, *et al.*, 2011, p.102). Los criterios usados son:

- Menores de 14 años
- Mayores de 65 años
- Discapacitados

“Se ha comprobado que la vulnerabilidad se relaciona significativamente con la edad, los niños (0-14 años) y los ancianos (65 años y más) son los más vulnerables ante cualquier peligro” (Aneas, *et al.*, 2011, p.102).

Dimensión económica: de acuerdo con Wilches (1993), quizás es el eje más significativo de la vulnerabilidad global. Los sectores económicos deprimidos de la humanidad son, por esa misma razón,

los más vulnerables frente a los riesgos naturales. Se define como la posibilidad de cada individuo de tener acceso a diferentes bienes y servicios básicos de acuerdo a sus recursos económicos. En este caso los criterios corresponden:

- Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Se consideran aquellos hogares en los que está presente algunos de los siguientes indicadores: 1) Hacinamiento: hogares con más de tres personas por cuarto, 2) Vivienda inadecuada: hogares que habitan en viviendas de tipo inconveniente de pieza de inquilinato, viviendas precarias, etc. 3) Condiciones sanitarias: hogares sin retrete o retrete sin descarga de agua. 4) Menores no escolarizados: la presencia de al menos un niño de 6 a 12 años que no asisten a la escuela. 5) Capacidad de subsistencia: cuatro o más personas por jefe de hogar que no haya completado el tercer grado de escolaridad primaria. (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, INDEC).
- Población desocupada: se refiere a personas que, no teniendo ocupación, buscan activamente trabajo.
- Población inactiva: conjunto de personas que no tienen trabajo ni lo buscan activamente. Incluye a jubilados, estudiantes y otras situaciones. (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, INDEC).

Los criterios seleccionados, contribuyen a un nivel socioeconómico bajo de la población, lo que los convierte más vulnerables frente al riesgo. La población desocupada hace que las personas sean dependientes de otras o no cuenten con los medios para recuperarse solos después de un desastre. Esta dimensión es significativa porque de alguna manera tiene una influencia transversal en las demás dimensiones.

Dimensión educativa: es el procesamiento de información con el propósito de reducir la vulnerabilidad. “Se considera que, de no existir alfabetización o nivel educativo mínimo, la persona o grupos se tornan vulnerables frente a la mayor parte de las situaciones peligrosas” (Aneas, *et al.*, 2011 p. 45). El criterio que describe esta dimensión es:

- Población con secundario incompleto.

Dimensión de las instalaciones vitales: se presenta una visión general en el departamento de las instalaciones esenciales frente a las amenazas naturales, para la cual se contemplan algunos equipamientos claves para el rescate o resguardo, es decir son espacios que deberían utilizarse como alojamiento temporal o para atención masiva en caso de emergencia. Por otro lado, se consideran la infraestructura de las líneas vitales; que son sistemas complejos cuya función es la distribución de recursos, el transporte de personas y bienes, así como la transmisión de información. Los criterios son:

- Escuelas
- Club
- Centros de atención primaria de la salud (CAPS)
- Iglesias
- Líneas vitales
- Espacios verdes

Desde esta perspectiva, los criterios de las instalaciones vitales, serán abordados y tal como se mostrará más adelante, desde la accesibilidad; y si bien podría considerarse simplista el considerar solamente a la población en relación a la distancia en que se encuentran en alguna de las instalaciones, es un paso importante para el traslado de personas y recursos. Ya que seguramente será más eficiente y cómodo el traslado hacia las instalaciones más próximas, administrando en forma más eficiente el tiempo en el traslado. Un análisis más completo en el caso de los CAPS debería considerar la capacidad del personal de socorro y la capacidad hospitalaria ante una demanda masiva de servicios médicos, en relación al cálculo de la probabilidad heridos y categorizados según la gravedad para optimizar la ayuda necesaria hospitalaria, como la cantidad de camas disponibles. Como también un estudio sobre cantidad de escombros sería útil para la movilización de personas y traslado.

De acuerdo a las entrevistas realizadas al personal del municipio de Pocito, no se obtuvo información sobre organizaciones de rescate en caso de emergencia y ni gente destinada para ayudar en caso de que se produzca un evento. Por esto mismo no se dispone de datos para evaluar la dimensión institucional de la vulnerabilidad. Siendo que un aspecto muy particular para la gestión del riesgo y de enorme importancia practica en el manejo de las emergencias, en cuanto constituye la preparación de la comunidad a través de

los organismos públicos y de socorro, para enfrentar una situación de desastre.

Dimensión social: medir la dimensión social significa incluir aspectos que representen la capacidad de la población para responder y recuperarse después de un impacto, incluyendo el contexto social, los bienes de capital, la cobertura de salud, etc. Los grupos más vulnerables son especialmente aquellos que tienen mayor inconveniente para recuperarse y retornar a las condiciones de normalidad previas al desastre. Wilches (1993), postula precisamente en la dimensión social, el nivel de traumatismo social resultante de un desastre es inversamente proporcional al nivel de organización existente en la comunidad afectada. Las sociedades que poseen una trama compleja de organizaciones sociales, tanto formales como no formales, pueden absorber mucho más fácilmente las consecuencias de un desastre y reaccionar con mayor rapidez que las que no atienen. Se refiere al nivel de cohesión interna que tiene una comunidad. “La vida de relación permite a la persona estar más informada y experimentar más frecuentemente situaciones de solidaridad” (Aneas, et al. 2011, p.45). Los criterios incluidos son:

- Uniones vecinales con personería jurídica
- No son propietarios de la vivienda y del terreno: no son propietarios del terreno los inquilinos, ocupantes por trabajo y ocupantes por préstamo.

Los datos fueron obtenidos de las siguientes fuentes:

- Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, año 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC).
- Dirección de Geodesia y Catastro de la provincia de San Juan. Año 2019
- Personas que se registraron entre octubre de 2008 a marzo 2009 para obtener el certificado de discapacidad que otorga la dirección provincial para personas con discapacidad que depende del Ministerio de Desarrollo Humano y Promoción Social.
- Atlas Socioeconómico de la provincia de San Juan, 2016. Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA), Facultad de Ingeniería, UNSJ.
- Municipalidad de Pocito.
- Dirección provincial de vialidad.

Seguidamente, mediante el coeficiente de Pearson se identificaron capas correlativas que son sobreabundantes ( $r > 0.5$ ), luego por economía de cálculo y de tiempo se debe eliminar algunas de ellas:

- Población inactiva
- No son propietarios de la vivienda y terreno
- Desocupados
- Edificaciones precarias
- Los menores de 14 años correlacionaban con varias variables, NBI, inactivos, secundario incompleto y no son propietarios de vivienda y terreno. Por esta razón, se decidió unirla con mayores de 65 años y discapacitados para formar un solo criterio, conformando el siguiente indicador.

$$H = \frac{M_{14} (0,75) + M_{65} (0,75) + D (1)}{\sum P_i}$$

**Ecuación 2.**

Donde:

$M_{14}$  = menores de 14 años,

$M_{65}$  = mayores de 65,

$D$  = discapacitados,

$P_j$  = suma de los pesos,

### 3.1. Mapa de vulnerabilidad global

Terminada la etapa de análisis de correlación, se está en condiciones de realizar el modelo de vulnerabilidad global con los criterios finales. Para ello, se utilizó el método de combinación lineal ponderada con pesos distintos.

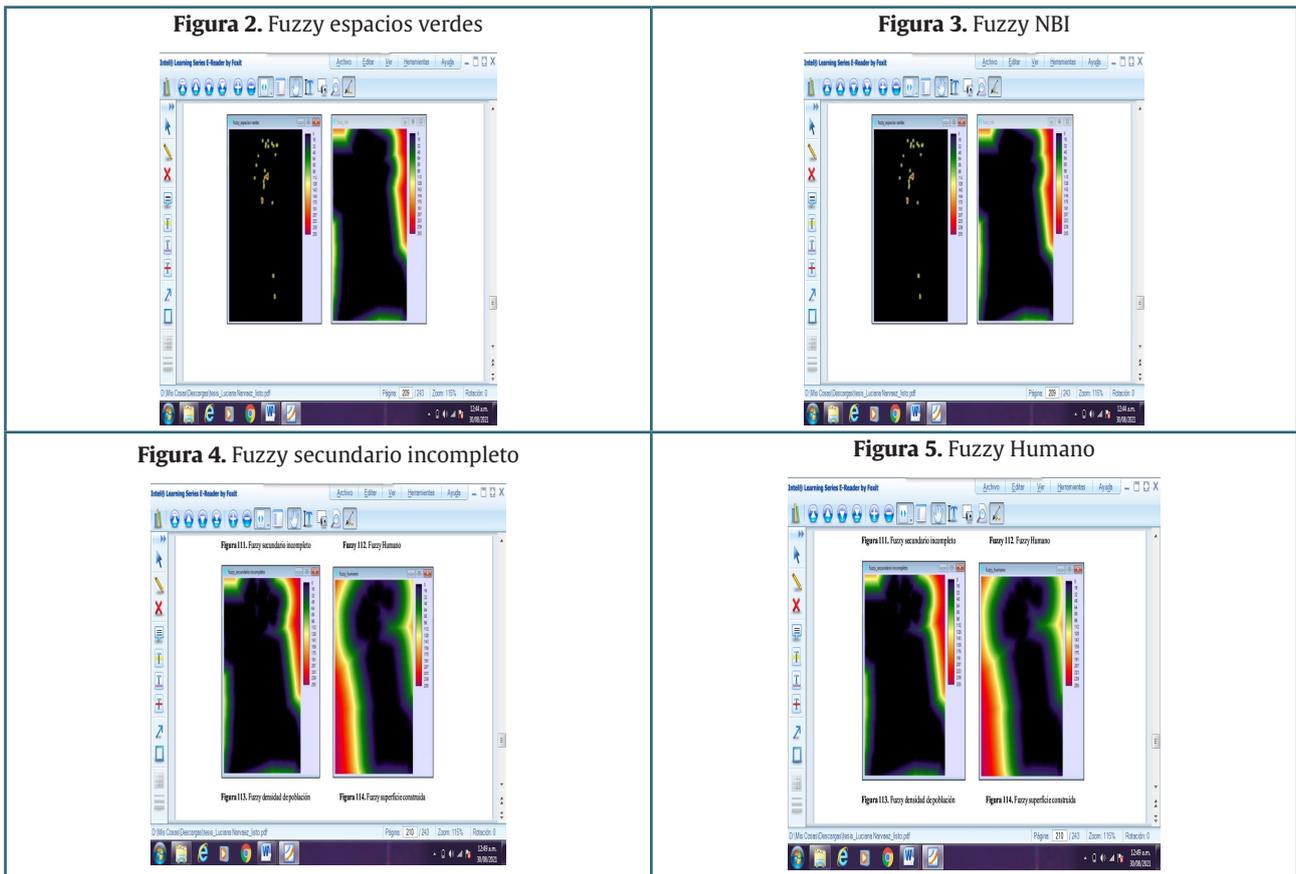
En cuanto a la realización del modelo con la técnica compensatoria (WLC) los criterios son transformados en factores (Tabla 3) con sus respectivas condiciones.

**Tabla 3.** Factores.

Criterios	Factores. Punto de corte de la capa
NBI	Adentro del área mayor a la mediana de 36,6 hogares: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 36,6 hogares: 0
Secundario incompleto	Adentro del área mayor a la mediana de 199 habitantes: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 199 habitantes: 0
Humano	Adentro del área del indicador mayor a la mediana de 130,65 habitantes: 1 Fuera del área del indicador mayor a la mediana de 130,65 habitantes: 0
Densidad de población	Adentro del área de densidad mayor a la mediana de 30,85 hab/km <sup>2</sup> : 1 Fuera del área de densidad mayor a la mediana de 30,85 hab/km <sup>2</sup> : 0
Edificación precaria regular	Adentro del área de edificaciones precarias mayor a la mediana de 26,3238 m <sup>2</sup> : 1 Fuera del área de edificaciones precarias mayor a la mediana de 26,3238 m <sup>2</sup> : 0
Superficie construida	Adentro del área de construcciones mayor a la mediana de 46,3238 m <sup>2</sup> : 1 Fuera del área de construcciones mayor a la mediana de 46,3238 m <sup>2</sup> : 0
CAPS	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Líneas vitales	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Clubes	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Escuelas	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Uniones vecinales	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Iglesias	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Espacios verdes	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1

Fuente: elaboración propia

Como paso siguiente a la aplicación del método, es necesario generar una estandarización fuzzy de cada uno de los factores analizando las funciones de pertenencia difusas y si son creciente o decreciente e ingresando los puntos de corte. Para el caso de los espacios verdes (Figura 2), clubes, escuelas, uniones vecinales, iglesias, líneas vitales, hospital la función utilizada es sigmoidea creciente, ya que a medida que nos alejamos de los lugares de alojamiento o rutas principales aumenta el riesgo. Con respecto al resto de los factores también se utilizó una función sigmoidea creciente, es decir que mientras mayor es la cantidad de hogares con NBI (Figura 3), la cantidad de personas con secundario incompleto (Figura 4), el factor humano (Figura 5), la densidad de población, las edificaciones precarias regular y la superficie construida en un área, mayor es el riesgo.



Luego, para la realización de este modelo, se debio precisamente calcular los pesos de cada factor a partir de asignarle a cada uno de ellos un nivel de importancia en base a la experiencia en el tema y en funcion de la escala definida por Saaty (Tabla 4).

Tabla 4. Pesos de los factores seleccionados.

Factores	Eigenvector
NBI	0.2361
Secundario incompleto	0.1149
Humano	0.1404
Densidad de población	0.0801
Edificación precaria regular	0.0728
Superficie construida	0.0739
CAPS	0.0789
Líneas vitales	0.0615
Clubes	0.0577
Escuelas	0.0391
Uniones vecinales	0.0391
Iglesias	0.0391
Espacios verdes	0.0391
Índice de consistencia= 0.05	

Fuente: elaboración propia en base a Saaty (1980).

Como se observa en la tabla el índice de consistencia c.r. es menor de 0.10 lo que indica que los pesos son correctos o es lo mismo decir que el nivel de jerarquías adoptado por el centro decisor para cada uno de los factores es óptima. Se ha considerado que el factor correspondiente a las necesidades básicas insatisfechas es la de mayor importancia frente a las amenazas (23,61%), seguido en importancia el factor humano (14,04%), de menor importancia le sigue el factor de población con secundario incompleto (11,49%) y así sucesivamente. Considerando esta ponderación, se procedió a realizar el modelo decisional de

vulnerabilidad global frente a la amenaza sísmica, amenaza de licuefacción y amenaza aluvional mediante el método de la WLC (Figura 6), resultando el siguiente modelo (Figura 7):

Figura 6. WLC en el software SIG

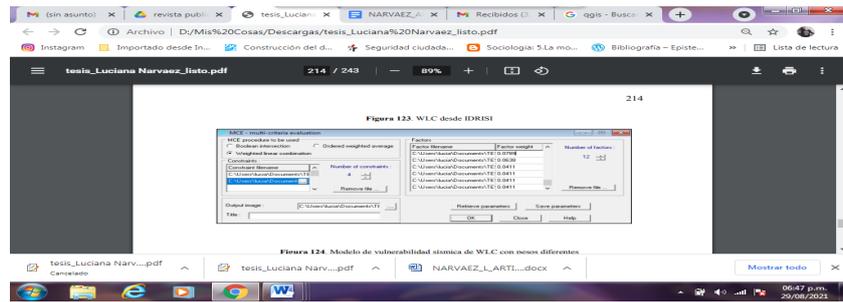
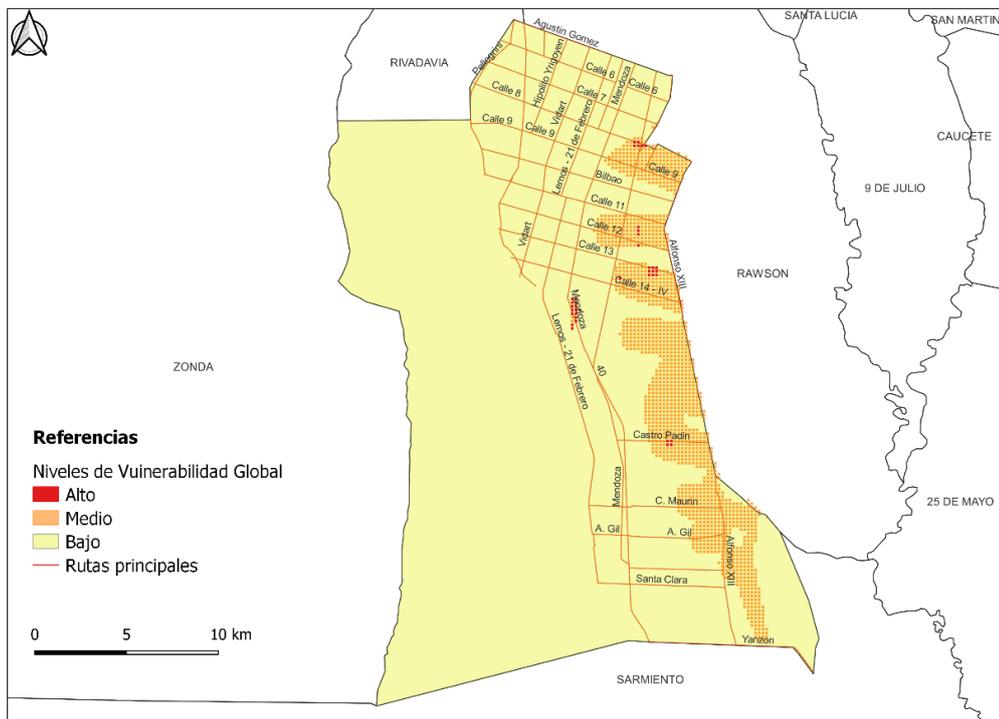


Figura 7. Mapa de vulnerabilidad global de WLC con pesos diferentes



Mediante el método de combinación lineal ponderada con pesos distintos, se identificaron áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad global frente a las amenazas naturales del departamento, las mismas son:

Áreas con vulnerabilidad alta: se identifican aquellas áreas en que las alternativas obtuvieron valores desfavorables en cada una de los criterios combinados. Es decir, entre la superposición de los factores edificaciones precarias regular, indicador humano, necesidades básicas insatisfechas, población con secundario incompleto, densidad de población, superficie construida, hospital, líneas vitales, clubes, escuelas, uniones vecinales, iglesias y espacios verdes. Los polígonos se localizan en forma puntual próxima al centro de Pocito y la zona Este en donde se encuentra la presencia de asentamientos precarios.

Áreas con vulnerabilidad media: se encuentra localizada en forma colindante a las áreas de vulnerabilidad alta y presentando una forma prevalectante en el sector Este de Pocito. En estas zonas se caracteriza por ser la compensación de forma equilibrada (no llevada a los extremos) que lo ocurrido en las áreas altas o bajas en la superposición de los criterios en las alternativas. Entre los factores correspondiente a las edificaciones precarias regular, indicador humano, necesidades básicas insatisfechas, población con secundario incompleto, densidad de población, superficie construida y la dimensión de las instalaciones vitales.

Áreas con vulnerabilidad baja: corresponde al resto del departamento, presentando las zonas con

valores favorables en cada una de los criterios combinados en una misma alternativa. Estos polígonos, presentan edificaciones sismorresistentes, indicador humano bajo, instalaciones vitales próximas, sin necesidades básicas insatisfechas, población con secundario completo, baja densidad de población y superficie construida.

### 3.2. Validación del modelo decisional de vulnerabilidad global

Los resultados obtenidos de análisis de sensibilidad explícitamente espacial revelan que los 13 modelos ejecutados (Tabla 5), donde se introducen factores y pesos con variaciones espaciales, presentan niveles de acuerdo superiores a 0,81 con respecto al modelo ejecutado con los factores y pesos iniciales (sin variación). Así, podemos señalar que todos los factores influyen de manera significativa o casi perfecta en el modelo de vulnerabilidad global ( $k_r$  o  $r$  entre 0.87 y 0.96). En todos los casos, podemos decir que los factores no son sensibles a las variaciones realizadas y por lo tanto es robusto el modelo de vulnerabilidad ( $k_r$  entre 1 y 0.81).

**Tabla 5.** Nivel de acuerdo entre el modelo original y los modelos contrastados con variación.

Nombre de los factores	Pearson	kappa	Modelos de contrastes
Necesidades básicas insatisfechas	0.95	0.95	Modelo final_1: NBI
Secundario incompleto	0.94	0.94	Modelo final_2: secundario incompleto
Humano	0.90	0.90	Modelo final_3: humano
Densidad de población	0.92	0.92	Modelo final_4: densidad de población
Superficie construida	0.91	0.90	Modelo final_5: superficie construida
Edificación precaria regular	0.91	0.90	Modelo final_6: edificación precaria regular
CAPS	0.93	0.93	Modelo final_7: hospital
Líneas vitales	0.96	0.95	Modelo final_8: líneas vitales
Clubes	0.96	0.96	Modelo final_9: clubes
Escuelas	0.95	0.95	Modelo final_10: escuelas
Uniones vecinales	0.96	0.96	Modelo final_11: uniones vecinales
Iglesias	0.90	0.90	Modelo final_12: iglesias
Espacios verdes	0.94	0.94	Modelo final_13: espacios verdes

Fuente: elaboración propia.

No obstante, se puede observar que la esencia del AS fue comprobar que pequeñas modificaciones en los factores y pesos no alteraban significativamente los resultados, o verificar qué factores fueron más sensibles del método OAT.

## 4. Conclusiones

Sin duda la vulnerabilidad es uno de los componentes fundamentales en la evaluación frente a las amenazas de origen natural, porque es la que permite diferenciar niveles de riesgo. Ya que en algunos casos la reducción de los peligros naturales resulta costoso o imposible, por eso conociendo la espacialización de la vulnerabilidad es posible proponer medidas estratégicas que minimicen el riesgo en las zonas más críticas. En este sentido, la aplicación del análisis espacial con la técnica de evaluación multicriterio en conjunto con los sistemas de información geográfica, permitió confeccionar una cartografía de la vulnerabilidad global en el departamento Pocito, demostrando ser muy eficaz para generar modelos decisionales para la toma de acción en la gestión del riesgo.

La EMC fue pensada para apoyar a las decisiones de los organismos del gobierno, en donde las pautas son complejas e intervienen múltiples criterios. Los métodos de EMC en el entorno de los SIG pueden ser utilizados en procesos de datos espaciales que requieran ser valorado, ordenados o bien sea clasificados según determinados criterios, ofreciendo así estas técnicas una herramienta adicional a las existentes en los SIG. Los métodos de EMC permiten un adecuado y eficaz uso del aspecto temático de los datos espaciales, bien sea en el modelo vectorial o en el raster. Por ello, potencia las operaciones en un SIG, haciendo posible la elaboración de modelos espaciales complejos, y que es una herramienta fundamental para la toma de decisión en el campo de los riesgos ambientales. Por otro lado, el análisis de sensibilidad explícitamente espacial es una importante herramienta complementaria de los SIG – EMC para asistir a los procesos de

planificación.

Se destaca que los resultados obtenidos del AS han demostrado que los resultados iniciales del modelo de vulnerabilidad global son robustos, ya que las pequeñas variaciones en los píxeles de los factores y pesos demostraron no ser sensibles e influir en forma significativa en el modelo.

Aunque el problema de la vulnerabilidad en Pocito se ha trabajado recientemente por otros especialistas, es relevante para el departamento una investigación con estas características. Dado que se muestra la falta de aplicación de metodologías más rigurosas para no caer en resultados generalizables en las unidades espaciales y complejizando la propuesta de medidas de mitigación del riesgo. Por otro lado, dichos trabajos muestran la falta de validación de los resultados obtenidos, llegando a ser poco confiables, ya que no se aplicaron métodos cuantitativos y/o cualitativos que demuestren que los mapas generados son válidos para explicar la realidad del tema.

Finalmente con este estudio y sus resultados, se ha tratado de reafirmar la importancia de investigar y avanzar en métodos de evaluación de la vulnerabilidad en forma integral, detectando las fragilidades de una comunidad expuesta a los peligros para posibilitar el planteo de las respuestas adecuadas, teniendo en cuenta que la seguridad no está garantizada sólo con una estructura sismorresistente, sino que es imprescindible que todo el sistema territorial funcione en la emergencia y luego de ella se reponga rápidamente.

A modo de cierre es importante destacar que, si bien los resultados obtenidos con esta investigación se presentan para un caso de estudio particular, su aporte principal consiste en su validez teórica y metodológica para ser empleados en diversos lugares de características similares.

## Referencias bibliográficas

- Aneas, S. Cattapan, S. Torres, E. y Pelegrina, C. (2011). *El hombre frente a los riesgos del ambiente*. Universidad Nacional de San Juan.
- Atlas Socioeconómico de la provincia de San Juan. (2016). Universidad Nacional de San Juan.
- Barredo, J. (1996). *Sistema de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial RA-MA.
- Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. [Tesis de doctorado]. Universitat Politècnica de Catalunya Escola Tècnica Superior D'enginyers de Camins, Canals i Ports.
- Guzzo, E. (2009). *Análisis de la vulnerabilidad frente a múltiples peligros naturales en el departamento de Pocito. Sismos y aluviones*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de San Juan.
- Microzonificación Sísmica el Valle de Tulúm. (1982). Instituto Nacional de Prevención Sísmica.
- Instituto Geográfico Nacional (2010). [www.ign.gob.ar](http://www.ign.gob.ar)
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (2010). <http://www.indec.gob.ar/>
- Nacif, N., y Esponisa, M. (2011). Estudio de vulnerabilidad a los fenómenos naturales. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 4(7), 76-88 doi: <https://doi.org/10.11144/javeriana.cvu4-7.evfa>
- Narváez, L. (2020). Modelo decisional de riesgo sísmico en el departamento Pocito (San Juan- Argentina). *Boletín geográfico*. Año XLII.N°42(2), 169-183. <http://revele.uncoma.edu.ar/htdoc/revele/index.php/geografia/article/view/3050/59946>
- Plata, W. (2010). *Descripción, Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano Mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El Caso de la Comunidad de Madrid*. Alcalá de Henares. [Tesis de doctorado]. Universidad de Alcalá.
- Dirección de Geodesia y Catastro de la Provincia de San Juan (2019). Ministerio de Haciendas y Finanzas.
- Dirección Provincial de Vialidad (2019). Ministerio de Obras y Servicios Públicos.
- Ministerio de Desarrollo Humano y Promoción Social (2008 a 2009).
- Municipalidad del departamento Pocito. Provincia de San Juan.
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
- Wilches, G. (1993). La vulnerabilidad global en Maskrey (Ed.), Los desastres no son naturales (pp. 11-41). LA RED. <https://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf>