



## Mapa de riesgo sísmico en el departamento Sarmiento (San Juan – Argentina)

Seismic risk map in the Sarmiento department (San Juan – Argentina)

**Luciana Maricel Narvaez**

**Recepción:** 30/07/2024

**Aceptación:** 19/12/2024

.....  
**Luciana Maricel Narvaez.** Licenciada y profesora en Geografía. Doctora en Geografía. Docente-investigadora en el Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes (FFHA), Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

✉ [lucinarvaez11@gmail.com](mailto:lucinarvaez11@gmail.com)



## RESUMEN

El departamento de Sarmiento, localizado en San Juan, Argentina, se encuentra en una zona de alta peligrosidad sísmica con antecedentes de terremotos destructivos. Ante esta situación, el presente trabajo tiene como objetivo principal contribuir al conocimiento sobre el riesgo sísmico. Desde la perspectiva de la Geografía de los Riesgos, pionera en este campo, se considera esencial evaluar de manera integral los componentes del peligro y la vulnerabilidad. La evaluación del riesgo sísmico se sitúa dentro del paradigma de la Geografía Automatizada, utilizando métodos robustos como la Evaluación Multicriterio y los Sistemas de Información Geográfica. Estas herramientas permiten generar modelos decisionales altamente confiables, que son validados mediante el Análisis de sensibilidad con enfoque explícitamente espacial. A través del diseño de cartografía, se identifican las zonas de mayor riesgo, que son las áreas que requieren más intervención en caso de un evento peligroso y donde se anticipan mayores daños a la población expuesta. Los modelos de riesgo sísmico son herramientas muy valiosas para la organización territorial, ya que la información que proporcionan es crucial para los responsables de las políticas de planificación y desarrollo territorial, permitiéndoles tomar decisiones más seguras sobre la mitigación del riesgo.

## ABSTRACT

The department of Sarmiento, located in San Juan, Argentina, is situated in an area of high seismic danger with a history of destructive earthquakes. Given this situation, the main objective of this work is to contribute to knowledge about seismic risk. From the perspective of Risk Geography, a pioneer in this field, it is considered essential to comprehensively evaluate the components of danger and vulnerability. The evaluation of seismic risk is situated within the paradigm of Automated Geography, using robust methods such as Multicriteria Evaluation and Geographic Information Systems. These tools allow the generation of highly reliable decisional models, which are validated through Sensitivity Analysis with an explicitly spatial approach. Through mapping design, the highest risk areas are identified, which are the areas that require the most intervention case of a dangerous event and where greater damage to the exposed population is anticipated. Seismic risk models are very valuable tools for territorial organization, since the information they provide is crucial for those responsible for territorial planning and development policies, allowing them to make safer decisions about risk mitigation.

### Palabras clave

peligro, vulnerabilidad, mapas, técnicas cuantitativas.

### Keywords

danger, vulnerability, maps, quantitative techniques.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de los riesgos en Geografía surge como respuesta a la inquietud generada por la creciente manifestación de estos fenómenos. A mediados del siglo XX, este campo comenzó a desarrollarse significativamente gracias a las aportaciones de Gilbert White, representante de la escuela norteamericana, y Jean Tricart, de la escuela francesa. La preocupación por el aumento de los riesgos naturales y antrópicos en el mundo impulsó el surgimiento de una nueva línea de investigación conocida como la Geografía de los Riesgos.

Un destacado pionero en este ámbito es el geógrafo Francisco Calvo García-Tornel, quien en 1984 presentó esta línea de trabajo como un nuevo paradigma, reconociendo a White (1942) y Kollmorgen (1953) como sus precursores. Desde sus inicios, la Geografía de los Riesgos centró su análisis principalmente en los peligros o amenazas naturales. El primer estudio relevante abordó los riesgos de inundaciones en las cuencas de los ríos Mississippi y Missouri en Estados Unidos. Con el tiempo, las investigaciones se expandieron hacia otras áreas y abarcaron una diversidad creciente de peligros.

A principios del siglo XXI, el estudio de la vulnerabilidad comenzó a consolidarse como un componente esencial del análisis del riesgo, lo que hizo imprescindible abordarlo desde diversas dimensiones y con enfoques multidisciplinarios. Los cambios mundiales de principio de siglo globalizaron el riesgo y se planteó la necesidad de trabajarlo en forma holística, es decir el ambiente natural con la sociedad en su conjunto. Cardona (2001) afirma:

El riesgo no ha sido conceptualizado de forma integral, sino de manera fragmentada de acuerdo con el enfoque de cada disciplina involucrada. Para estimar el riesgo de acuerdo con su definición es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades (p. 14).

El estudio de los riesgos en Geografía, se enmarca en el enfoque metodológico de la complejidad con aplicaciones sistémicas. Ello permite construir un marco integrador con las amenazas y la vulnerabilidad, considerando que los riesgos no son sólo como el resultado de un fenómeno natural, sino de un conjunto de procesos

interrelacionados. De esta manera, los riesgos se relacionan con las amenazas o peligros en un espacio y un tiempo específico y con los aspectos de vulnerabilidad de la población. Por lo expresado anteriormente, desde la Geografía de los Riesgos conceptualizamos al riesgo sísmico de la siguiente manera: *Riesgo sísmico = peligro sísmico X vulnerabilidad*.

El riesgo, caracterizado por su complejidad y dinamismo en toda sociedad, puede analizarse a través de numerosos indicadores. Hasta la fecha, no existe un criterio único para evaluarlo. Por esta razón, en esta investigación se propone una metodología que busca aproximarse a un criterio holístico. Como base territorial, se ha seleccionado un área pequeña con delimitación político-administrativa: el departamento Sarmiento en la provincia de San Juan (Argentina). Esta elección se fundamenta principalmente en su alta sismicidad y gran concentración de la población, lo que lo convierte en un caso testigo interesante para ensayar la metodología propuesta. Con el objetivo de identificar las zonas de mayor riesgo, que son las áreas que requieren mayor intervención en caso de un evento peligroso y donde se esperan más daños a la población expuesta.

La metodología seleccionada para lograr un criterio unificado en la estimación del riesgo sísmico combina la técnica de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta combinación ha sido poco explorada a nivel mundial en el campo de los riesgos ambientales. Los SIG permiten un análisis especializado de datos espaciales, pero presentan limitaciones en el tratamiento de datos temáticos. Por otro lado, la EMC se destaca por su potencial en el procesamiento de estos datos, por lo que la integración de ambas técnicas crea una herramienta valiosa para el análisis espacial. Para dar robustez al modelo, se complementa la EMC-SIG con el Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial (AS), una metodología utilizada en la validación.

La obtención de los modelos de riesgo en el departamento de Sarmiento comprende la evaluación del peligro sísmico y la vulnerabilidad sísmica en forma integral. El peligro es muy alto en todo territorio<sup>1</sup> por lo que las diferencias de riesgo serán determinadas por

1 <https://www.argentina.gob.ar/inpres/ingenieria-sismorresistente/zonificacion-sismica>

la vulnerabilidad. Este último componente se presta para realizar un desarrollo más amplio, dado que es aquí donde se debe enfocar si se pretende minimizar el riesgo.

La producción de los modelos de riesgo sísmico puede establecerse a partir del conocimiento de las restricciones y factores del territorio en función del peligro y la vulnerabilidad. La vulnerabilidad basada en la exposición, fragilidad social y falta de resiliencia, es decir, integrando estos tipos de criterios podemos plantear diferentes niveles de riesgo para las unidades espaciales que conforman el departamento Sarmiento.

Una vez establecidos los valores de las categorías de cada factor, así como la ponderación de cada uno (según corresponda), las operaciones de superposición del SIG permiten integrar los factores y los limitantes en las capas temáticas iniciales correspondientes, mediante una serie de operaciones aritméticas de las tantas que dispone la EMC en la regla de decisión.

Finalmente, los modelos de riesgo desarrollados con diferentes algoritmos que propone la EMC se validan estadísticamente con el Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial y con el análisis In-situ. De esta manera se contribuye al diseño de un modelado de riesgo con alto nivel de exactitud y precisión a la realidad sísmica de Sarmiento.

### 1.1 Antecedentes de trabajos

A raíz de importantes terremotos ocurridos en diferentes países ubicados en áreas de amenaza sísmica alta, ha sido necesario desarrollar métodos para evaluar el riesgo sísmico con el fin de evitar que el número de víctimas y pérdidas materiales sea mayor. En este sentido, se presenta una recopilación sobre varias metodologías existentes para evaluar los riesgos sísmicos, dentro de las que se destacan las siguientes: Metodología Urban System Exposure (USE), Metodología basada en Sistema de Información Geográfica (SIG) para el análisis de la vulnerabilidad sísmica urbana y Estimación holística del riesgo sísmico.

La metodología Urban System Exposure (USE) fue desarrollada como parte del proyecto de investigación GEMITIS (1996-1999) dirigido por Masure (Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM). Se terminó de desarrollar y fue aplicada como parte del proyecto Rick-EU, (Masure y Lutoff, 2022), a las ciudades de Barcelona, Bitola, Bucarest, Catania, Niza, Sofía

y Thessaloniki. Esta metodología busca definir una ciudad como un sistema e identificar los principales puntos para analizar el valor de los elementos expuestos. Identifica tres períodos o momentos de tiempo principales en el funcionamiento de un centro urbano después de ocurrido un suceso catastrófico y antes de retornar a su desarrollo normal.

En cuanto a la Metodología SIG para el análisis de la vulnerabilidad sísmica urbana, Rasched y Week (2003) desarrollaron una metodología que integra técnicas de análisis espacial multicriterio y lógica difusa. Este método fue aplicado a la ciudad de Los Ángeles. La vulnerabilidad como un problema de búsqueda espacial tiene en cuenta tres puntos. El primero considera que, aunque el proceso de daño lo inicia un sismo específico, su posterior curso depende de condiciones en y alrededor de la zona de impacto que conforman la cadena de potenciales fallas en la sociedad. El segundo punto tiene en cuenta que la vulnerabilidad se modifica continuamente con las acciones humanas en el tiempo y espacio. El último punto se refiere a que la vulnerabilidad desde diferentes puntos de vista no desecha el hecho de que el conocimiento de las propiedades geofísicas de los sismos es esencial.

Cardona (2001) plantea una estimación holística del riesgo sísmico, teniendo en cuenta un marco conceptual integrador y un enfoque holístico para la evaluación del riesgo de desastre, que no solo tiene en cuenta variables relacionadas con los efectos físicos, sino también variables relacionadas con aspectos sociales, económicos, y de capacidad de respuesta o recuperación post-desastre o resiliencia.

En base a la recopilación detallada de diversos textos con la temática en estudio se hizo especial hincapié en la forma como ha sido tratado el riesgo, el estado de avance y las tendencias existentes. En tal sentido, es fundamental la elaboración de mapas del riesgo para la planificación de la intervención en la amenaza o la vulnerabilidad, sino también para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos de respuesta deben realizar durante la etapa de preparación para la emergencia. Es importante observar que un plan operativo elaborado con base en un mapa de riesgo puede ser mucho más eficiente que si se realiza sin conocer dicho escenario, porque permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre.

### 1.2 Área de estudio

El departamento Sarmiento fue creado el 25 de agosto de 1908 mediante la Ley Orgánica del Régimen Municipal N° 3.848 y se designó a Villa Media Agua como su cabecera departamental. Sarmiento está localizado en el extremo centro sur de la provincia de San Juan a 59 kilómetros de la Ciudad de San Juan (Figura 1). Limita al Norte con los departamentos de Zonda, Pocito y Rawson; al Sur, con la provincia de Mendoza; al Este, con el departamento 25 de Mayo y al Oeste con el departamento Calingasta.

La configuración estructural del departamento Sarmiento, lo sitúa dentro de los sistemas de fallas de la Precordillera. Se estima que este sistema de fallas, con una extensión de 250 km, podría generar terremotos de magnitud superior a 7 en la escala de Richter. Además, es importante considerar los sismos de origen interplaca, asociados a la liberación de energía provocada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Se considera que la magnitud máxima

atribuida a esta fuente sísmica también puede superar los 7 grados en la escala de Richter (INPRES, 1989).

Es importante destacar que Sarmiento se encuentra dentro de la franja de mayor nivel de peligro sísmico, considerando las intensidades máximas (grado IX en la escala de Mercalli Modificada) y teniendo en cuenta los registros históricos de actividad sísmica, especialmente los terremotos de magnitud superior a 7. Estas características naturales del territorio mantienen a la región en constante alerta sísmica, lo que la categoriza como un área de peligrosidad muy elevada según los niveles de zonificación establecidos en la provincia (INPRES, 1989).

En el sector Este de Sarmiento, reside aproximadamente el 70% de la población total. Además, en esta área se desarrollan las principales actividades económicas relacionadas con el sector secundario y terciario. Destacándose la infraestructura esencial que conforma el nodo central de Media Agua, así como los servicios básicos de educación y los centros de atención primaria de salud.

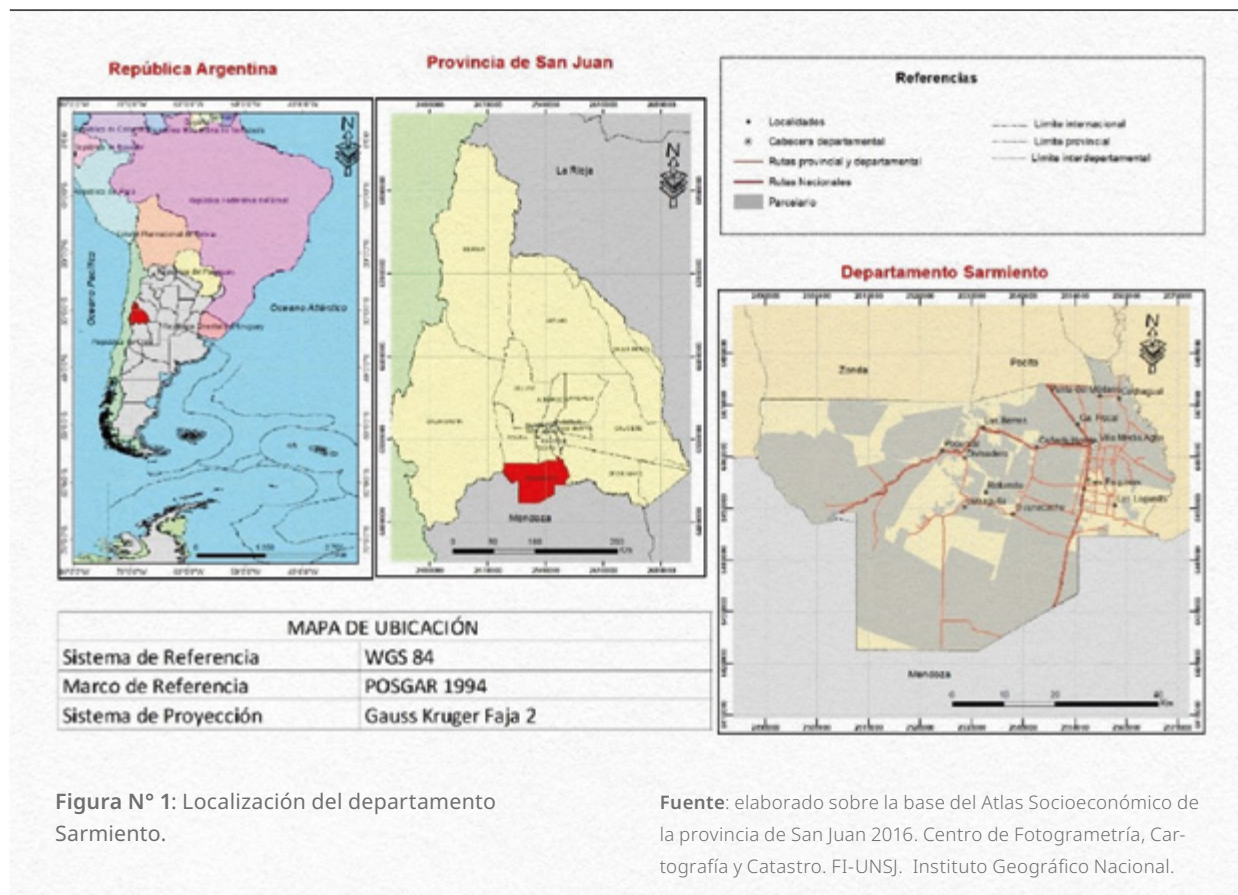


Figura N° 1: Localización del departamento Sarmiento.

Fuente: elaborado sobre la base del Atlas Socioeconómico de la provincia de San Juan 2016. Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro. FI-UNSJ, Instituto Geográfico Nacional.

## 2. MÉTODO

La metodología de modelado espacial adoptada en este estudio para generar los modelos decisionales de riesgo sísmico consiste en la conjunción de las técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica y el Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial, que forman parte del análisis espacial.

La aplicación de la metodología consiste en elaborar la base de datos geográfico mediante la conformación de los criterios de los tipos factores y limitantes. “Un factor es un criterio que realiza 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” (Barredo, 1993 p. 59). El criterio de tipo limitante restringe la disponibilidad de algunas alternativas según la actividad evaluada; con este tipo de criterio se excluyen varias categorías de la capa analizada para la evaluación; es decir, se genera una capa binaria (sí o no; 1 o 0) en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro, la no disponibilidad para la actividad.

Uno de los principios de la EMC establece que el conjunto de criterios a ser incluidos para evaluar un determinado estudio debe ser completo, es decir abarcando todas las dimensiones posibles del fenómeno; por otro lado; deben ser mínimos y no redundantes, 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 aplica la técnica paramétrica de Producto Momento o Pearson, considerando capas correlacionadas a los valores de  $r > 0.50$ .

Una vez que se han creado las capas temáticas de cada uno de los criterios seleccionados, se combinan mediante la regla de decisión para lograr la evaluación. Una regla de decisión puede ser simple cuando se aplica un solo criterio o puede ser compleja cuando se integra un conjunto de criterios diferentes (Evaluación Multicriterio). En esta última regla de decisión se basan los modelos decisionales de riesgo sísmico, ya que abarca la evaluación de varios criterios distintos. Las operaciones utilizadas en la evaluación de múltiples criterios son las siguientes.

### Método de combinación lineal ponderada (WCL)

En cada factor estandarizado se procede a la asigna-

ción de los pesos y a la multiplicación de las correspondientes alternativas, permitiendo acceder seguidamente al procedimiento de suma lineal ponderada como procedimiento de la EMC. Siguiendo a Barredo (1993) la ecuación es la siguiente:

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

$r_i$  = modelo decisional o mapa de riesgo sísmico

$w_j$  = 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, se puede establecer las áreas más vulnerables frente al peligro sísmico a través de las alternativas que hayan obtenido los valores de riesgos ( $r_i$ ) más altos.

Como paso previo a la aplicación del método, es necesario generar una estandarización continua y difusa (fuzzy) de cada uno de los factores para obtener mapas comparables. La lógica fuzzy es la que permite obtener mapas de riesgos continuos para cada factor, en donde cada localización se clasifica en cuanto al nivel que tiene entre los extremos. Acá los valores continuos se consideran variaciones en el riesgo y con funciones de crecimiento o decrecimiento con la distancia. Se logra un riesgo diferencial dentro de la zona, es decir, todos tienen riesgo, pero no el mismo. Los valores varían entre 0 y 1 o entre 0 y 255.

Una vez definidos los criterios estandarizados que serán combinados a través de la WCL, el paso siguiente es la elección de los procesos de ponderación. La toma de decisión implica que la importancia de cada uno de los criterios sea diferente entre sí. Esto se logra colocando pesos a cada uno de los criterios definidos. Si bien es frecuente la asignación de pesos a los criterios del territorio, no existe un método generalmente aceptado para su determinación. Entre ellos se pueden mencionar la técnica de ranking recíproco, la escala de siete puntos, el método de los ratios y el método de las jerarquías analíticas (MJA). En este trabajo se optó por la aplicación de la última técnica mencionada (MJA) propuesta por Saaty (1980) para la asignación de los pesos, que ofrece una medida cuantitativa de la consistencia para validar los juicios.

La consistencia de los juicios es lo que diferencia al MJA de los demás métodos de asignación de pesos, ya que

indica un dato cuantitativo acerca de la distribución de los juicios de valor. La consistencia tiene relación con el grado de dispersión de los pesos establecidos. El valor que ofrece este procedimiento para el cálculo de la consistencia es la razón de consistencia (consistency ratio, c.r.), la fórmula es:

$$cr = \frac{ci}{ri}$$

Sea:

$cr$  = razón de consistencia

$ci$  = índice de consistencia (consistency index)

$ri$  = índice de aleatoriedad (random indec, r.i.)

Concretándose así que para valores de  $cr$  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,  $cr$  es inferior a 0,10 podemos considerar satisfactorios los juicios de valor asignados.

$cr < 0,10$  consistencia razonable

$cr \geq 0,10$  contrario, inconsistente

#### **Método Booleano por multiplicación (AND-Nivel de riesgo mínimo)**

La regla de decisión concerniente al nivel de riesgo mínimo se resuelve de la siguiente manera:

$$A = f_1 \times f_2 \times f_3 \dots \times f_n = \prod f_x$$

Donde: A es el resultado que obtendrían las localizaciones (celdas) del mapa final, donde tendrá el valor 1 cuando coincidan con el valor 1 todos los factores y 0 cuando haya un 0 en alguno de ellos. La estandarización con lógica booleana y la multiplicación de matrices (AND), muestra un resultado único y preciso de los sitios con mayor riesgo, pues allí coinciden las peores condiciones de cada factor. Como resultado de la estandarización booleana y la multiplicación de matrices se obtiene un mapa de riesgo mínimo, que indica localizaciones seleccionadas con el mínimo riesgo de equivocarse.

#### **Método booleano por suma (OR-Nivel de riesgo creciente)**

El presente método de nivel de riesgo máximo basa la regla de decisión en la intersección booleana a partir de la suma de matrices, que permite obtener una ap-

titud escalonada y progresiva en riesgo de tomar una decisión locacional. Amplía la superficie de elección locacional al mismo tiempo que aumenta la posibilidad de tomar una decisión incorrecta, mayor es la incertidumbre y el riesgo que se corre en la decisión final. Una solución por suma estaría dada por:

$$B = f_1 + f_2 + f_3 \dots + f_n = \sum f_x$$

Dónde: B es un resultado que contiene una variedad de aptitudes locacionales. El espacio más favorable toma un valor de  $DN=n$ , la segunda áreas  $DN=n-1$  hasta llegar a las áreas que no tienen aptitud en ninguno de los factores con  $DN=n-n=0$ . Esto significa una aptitud escalonada y progresiva en el riesgo de tomar una decisión locacional incorrecta.

Existen distintas formas de validar los resultados, con procedimientos estadísticos complejos como el Análisis de Sensibilidad y otra forma es hacer la validación In-situ, adoptadas en este trabajo.

La determinación de hacer la validación In-situ se debe a que es muy efectiva porque se contrasta lo determinado por los modelos (estado del terreno, rutas, edificaciones, suelos, etc.) directamente con el mundo real. Con el fin de verificar qué mapa explica mejor el riesgo sísmico en Sarmiento de acuerdo con los factores y limitantes impuestos. En la realización de las mismas se extrajeron coordenadas aproximadas de las zonas y con ayuda de un navegador se rastrearon las zonas hasta llegar a ellas, se realizó una observación In-situ de las situaciones habitacionales y medición de distancias necesarias hacia las instalaciones vitales. Otro método, consistió en hacer una localización a tiempo real a partir del mapa del modelo locacional elegido en la pantalla de la PC, conectado a un GPS y a través de un programa como Global Mapper realizar la tarea.

El Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial en modelos decisionales de riesgos ambientales es imprescindible para dar robustez y credibilidad a los resultados obtenidos. Esta propuesta metodológica se basa en la introducción de un cierto porcentaje de variación ( $\pm 25\%$ , para este caso) de forma aleatoria en los valores de adecuación de los factores espaciales y en los pesos rasterizados a nivel de píxel, siguiendo el zonamiento propuesto por Lilburne y Tarantola (2009).

Una vez obtenidos todos los factores y pesos con variación espacial, se utilizaron como insumo para generar una serie de mapas de riesgo sísmico aplicando

la sumatoria lineal ponderada. Para ello se utilizó un procedimiento del tipo *One at a Time Factor* (OAT), es decir, se ejecutaron los modelos introduciendo cada vez un factor y su correspondiente peso modificados (variación espacial de  $\pm 25\%$ ) y manteniendo los demás en su estado original. En la cuantificación del impacto de cada factor con el modelo original fue necesario re-clasificar los modelos decisionales (continuos) en ma-

pas binarios. Posteriormente, se utilizó el estadístico Kappa para establecer el nivel de acuerdo o desacuerdo entre dichos mapas binarios y su similar obtenido con los factores y pesos originales. De esta forma, a partir de los valores del estadístico  $K_R$ , y considerando la clasificación propuesta por Landis y Koch (1977), se determina el grado de influencia de cada factor y su correspondiente peso en los modelos ejecutados (Tabla 1).

Clasificación $K_R$	Acuerdo	Desacuerdo
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

Tabla 1: Escala de valoración del índice  $K_R$ . Fuente: : elaborado por Landis y Koch, 1997.

### 3. DESARROLLO

El diseño del mapa de riesgo sísmico es el objetivo central de este trabajo y el que estructura el método aplicado. Para iniciar el funcionamiento de la EMC-SIG se debe generar la más confiable base de datos geográfica. La misma se compone de los criterios considerados como los más representativos y accesibles a las fuentes de información, para estimar el riesgo. De esta manera, el control de los criterios es una tarea que indudablemente influye en todo el proceso de evaluación, ya que la inclusión o exclusión de algunos genera resultados diferentes, por esto el establecer un conjunto de criterios válidos y su correspondiente valoración es la base de todo el procedimiento de la EMC.

En este caso, la selección de los criterios para la estructuración del modelo, se encuentra guiadas por el patrón que especifica: ¿Qué criterios corresponde utilizar en la medición del peligro y cuáles en los elementos exposición, fragilidad social y falta de resiliencia que inciden en la vulnerabilidad sísmica? De esta manera se establecen las características que debe reunir un territorio para precisar un nivel de riesgo planteado.

Seguidamente se explican los criterios seleccionados para evaluar el riesgo, correspondiente a los componentes del peligro sísmico y la vulnerabilidad, quedando conformada la base de datos geográfica para su correspondiente operación. En este último componente, dichos criterios se agrupan en dimensiones y éstas en los elementos de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia, según pertenencia.

El peligro sísmico se refiere a la ubicación de la población en zonas con mayor exposición al riesgo y al análisis de otros factores que evidencien la vulnerabilidad de la comunidad, como los epicentros históricos de sismos destructivos, la recurrencia temporal de los fenómenos, y la distribución de sus magnitudes e intensidades. Además, fue crucial considerar uno de los peligros secundarios más importantes que pueden surgir a raíz de los sismos en el departamento de Sarmiento, ya que aumenta el impacto en la población afectada. Los criterios usados para su medición son:

- **Mapa de aceleración:** muchas fallas estructurales en los edificios surgen de las aceleraciones del suelo sobre las edificaciones. Las ondas sísmicas mueven edificios en las tres direcciones y la razón del cambio en sus mo-



vimientos se conoce como aceleraciones, que varían mientras dure el terremoto. La aceleración sísmica es la medida de un terremoto más utilizada en ingeniería, y es el valor utilizado para establecer normativas sísmicas y zonas de riesgo sísmico. En el Mapa de Zonificación Sísmica del Reglamento INPRES-CIRSOC 103, se encuentran identificadas cinco zonas, siendo la máxima aceleración del terreno la que permite comparar la actividad sísmica en cada una de ellas.

• **Mapa de licuefacción:** “El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante la sacudida sísmica por la propagación de las ondas de cizalla” (Perucca et al., 2006, p.14).

• **Epicentros:** La zonificación es un mapa o mapas que muestra una cantidad (o cantidades) relacionada con la frecuencia e intensidad esperadas de la sacudida que pueden provocar los sismos futuros en las cercanías del lugar de que se trate (INPRES, 1989). Estos mapas pueden ser de epicentros, de aceleración máxima, de intensidades, entre otros.

La vulnerabilidad depende directamente de la exposición de los elementos que se encuentran localizados en una zona con cierto nivel de peligrosidad y que pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo de la fragilidad social, lo que a su vez determina, en parte, la menor o mayor resiliencia de la población, ocasionando un cierto nivel de vulnerabilidad en el área. El enfoque abordado pretende ser lo más abarcador posible para lograr una gestión integral del riesgo para el desarrollo sostenible, permitiendo encontrar las causas de fondo que lo originan y poder mitigarlas mediante medidas que respondan a la exposición y fragilidad social pero también mejorar la capacidad de resiliencia de la población. De esta manera la selección de los criterios responde a los elementos mencionados:

• **Exposición:** el riesgo existe donde se encuentra población que puede verse afectada por el desenlace del peligro. 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 (educativas, económicas, culturales, etc). Los criterios considerados son:

- Densidad de población: cantidad de habitantes por km<sup>2</sup> de superficie (INDEC, 2010).

- Superficie construida: definida como el área que cubre las edificaciones en m<sup>2</sup> en relación a la superficie total de referencia (Dirección de Geodesia y Catastro, 2019).

• **Fragilidad social:** se incluyen para la evaluación diferentes dimensiones correspondientes a la habitacional, humana, económica y educativa.

La dimensión habitacional se ocupa de las características de la construcción. Definida 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. Para su determinación se seleccionaron los siguientes criterios:

- Edificaciones precarias (Dirección de Geodesia y Catastro, 2019)

- Edad de las edificaciones (Dirección de Geodesia y Catastro, 2019)

- Calidad de conexión a servicios básicos insuficientes: refiere al tipo de instalaciones con que cuentan las viviendas para su saneamiento. Para este indicador, se utilizan las variables procedencia del agua y tipo de desagüe (INDEC, 2010). En este criterio se engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores.

La dimensión humana, se refiere a las características de cada individuo que condicionan su vulnerabilidad (Aneas et., al 2011). Los criterios usados son:

- Menores de 14 años (INDEC, 2010)

- Mayores de 65 años (INDEC, 2010)

- Discapacitados (Ministerio de Desarrollo Humano y Social, 2008)

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).

En el caso de la dimensión económica se coincide con Wilches-Chaux, (1993), en cuanto es considerada el eje

más significativo de la vulnerabilidad global. Los sectores económicamente 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. Los criterios en este caso son:

- Necesidades básicas insatisfechas: 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 (INDEC, 2010).

- Población inactiva: conjunto de personas que no tienen trabajo ni lo buscan activamente. Incluye a jubilados, estudiantes y otras situaciones (INDEC, 2010).

- Población desocupada: se refiere a personas que, no teniendo ocupación, buscan activamente trabajo (INDEC, 2010).

- Sin Cobertura de salud: indica la población que no tiene obra social, prepaga o plan estatal (INDEC, 2010).

La última dimensión de este elemento es la educativa y se refiere al procesamiento de información con el propósito de reducir la vulnerabilidad (Wiches-Chaux, 1993). 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). El criterio escogido es:

- Población con secundario incompleto (INDEC, 2010).

- **Falta de resiliencia:** se considera importante incorporar en la evaluación de este elemento la dimensión de las instalaciones vitales y la dimensión social.

En la dimensión de las instalaciones vitales, se presenta una visión general en el departamento de las

instalaciones esenciales frente a un sismo, para la cual se contemplan algunos equipamientos claves para el rescate o resguardo, es decir 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. En general las líneas vitales corresponden a la infraestructura de servicios públicos que se consideran básicos o esenciales. Estas abarcan transportes, energía, electricidad, gas, líneas de teléfonos, entre otros. Los criterios se conformaron mediante los datos obtenidos del Atlas socioeconómico de San Juan, 2016. Son establecidos por la presencia de:

- Escuelas
- Clubes deportivos
- Centros de atención primaria de la salud (CAPS)
- Iglesias
- Líneas vitales
- Cuartel de bomberos y puestos policiales
- Espacios verdes

Un área de servicio es una serie de polígonos que representan la distancia que se puede alcanzar desde una instalación en un período de tiempo especificado. En este caso la distancia representada (5 km) es la que le correspondería servir desde el cuartel de bomberos y cada uno de los puestos policiales de Sarmiento en el momento de un desastre, según la entrevista realizada al referente de bomberos.

Las áreas de servicio comúnmente se utilizan para visualizar y medir la accesibilidad. Con la Extensión *Network Analyst* se pueden encontrar las áreas de servicio situadas alrededor de cualquier ubicación en una red. Un área de servicio de red es una región que abarca todas las calles accesibles (es decir, calles que están dentro de una impedancia especificada).

La dimensión social incluye 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 aque-

llos que tienen mayor inconveniente para recuperarse y retornar a las condiciones de normalidad previas al desastre. Wilches (1993), postula precisamente en la dimensión social, que 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 tienen. Se refiere al nivel de cohesión interna que tiene una comunidad. Los criterios incluidos son:

- Uniones vecinales con personería jurídica (Municipalidad de Sarmiento, 2023).
- No son propietarios de la vivienda y del terreno: inquilinos, ocupantes por trabajo y ocupantes por préstamo (INDEC, 2010).
- Delincuencia: considerando los datos de la población obtenidos de las siguientes preguntas: en los últimos 12 meses, ¿alguien le robó a mano armada? ¿usted vio que le robaron a mano armada a otra persona? ¿fue golpeado/a por otra persona? (INDEC, 2010).

Una vez generadas las capas temáticas de cada uno de los criterios, se procedió a realizar el análisis de correlación entre ellas por medio del coeficiente de Pearson. Como resultado, se identificaron capas correlativas que son sobreabundantes ( $r > 0.5$ ), luego por economía de cálculo y de tiempo se eliminaron algunas de ellas:

- **Mapa de licuefacción:** en la tabla de atributos del mapa de aceleración se encuentra un campo con los niveles de licuefacción. Los polígonos que representan los niveles son similares a los valores de aceleración.
- **Población inactiva:** está altamente correlacionada con varias variables que son los grupos de mayores de 65 años, menores de 14 años y población con secundario incompleto. Además, se disponen de otras variables que miden la dimensión económica, siendo importante la consideración de las variables que integran los grupos más vulnerables con la variable educación.
- **No son propietarios de la vivienda y terreno:** porque está altamente correlacionada con los grupos menores de 14 años, desocupados, secundario incompleto y sin cobertura de salud. En este caso, se sigue prefiriendo

dejar variables que midan los grupos más vulnerables y la educación. Asimismo, se cuenta con otras variables que miden lo social.

- **Desocupados:** correlaciona altamente la población que tiene el secundario incompleto, no son propietarios de la vivienda y terreno, delincuencia, sin cobertura de salud, calidad a conexión a servicios básicos insuficientes y necesidades básicas insatisfechas. Debido a que se cuenta con variables que miden la dimensión económica se decidió eliminarla y considerar el resto de las variables.
- Los menores de 14 años correlacionan con varias variables, 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 un indicador que será explicado en la etapa siguiente.

Terminada la etapa de elaboración de la base de datos geográfica con las capas generadas de los criterios seleccionados y sometidos a evaluación de detección de errores (atípicos o groseros) y el análisis de correlación, se está en condiciones de realizar los distintos modelos decisionales de riesgo sísmico con los criterios finales.

- Booleano con nivel de riesgo mínimo (AND) y Booleano con nivel de riesgo creciente (OR)

Este método requiere transformar las coberturas en criterios de tipo factor o limitante. Una vez obtenidos los criterios a utilizar, se deben estandarizar con la técnica booleana (0, 1) y proceder a obtener el modelo. Se le asignó un valor de 1 a los elementos considerados con mayor riesgo y valor de 0 al resto, es decir no existencia de riesgo. Las condiciones para los cortes fueron las siguientes (Tabla 2).

En cuanto la realización del modelo booleano con nivel de riesgo creciente (OR) se utilizó la herramienta *Image Calculator* del software SIG, sumando los factores y multiplicando por el producto de las restricciones, obteniendo un modelo con zonas de riesgo sísmico de riesgo creciente.

### Combinación lineal ponderada con pesos distintos

En cuanto a la realización de los modelos con técnicas compensatorias (WLC) los factores deben ser normalizados. Es decir, es necesario generar una estandarización continua y difusa (*Fuzzy*) de cada uno de los fac-

Crterios	Puntos de corte
Mapa de aceleración	Adentro del área de mayor aceleración y licuefacción alta: 1 Fuera del área de mayor aceleración y alta licuefacción: 0
Epicentros	Adentro del área de mayor frecuencia: 1 Fuera del área de mayor frecuencia: 0 El mapa de densidad de epicentros se calculó mediante el algoritmo de Kernel. Las superficies resultantes que rodean a cada punto en la densidad Kernel se basan en una fórmula cuadrática con el valor más alto en el centro de la superficie (la ubicación del punto) y se estrechan hasta cero en la distancia de radio de búsqueda.
Edificaciones precarias	Adentro del área de edificación precaria: 1 Fuera del área de edificación precaria: 0
Edad de las edificaciones	Adentro del área de edificaciones construidas antes del año 1944: 1 Fuera del área de edificaciones construidas después del año 1944: 0 La elección se debe al terremoto de magnitud 7,4 sucedido ese año.
Líneas vitales	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Densidad de población ponderada	Adentro del área de densidad mayor a la mediana de 0,24 hab./km²: 1 Fuera del área de densidad mayor a la mediana de 0,24 hab./km²: 0
Superficie edificada	Adentro del área de edificaciones mayor a la mediana de 54,698m²: 1 Fuera del área de edificaciones mayor a la mediana de 54,6984 m²: 0
Humano	Adentro del área del indicador mayor a la mediana de 458,6 hab.: 1 Fuera del área del indicador mayor a la mediana 458,6 hab.: 0 $H = \frac{(M\ 14\ (0,75) + M\ 65\ (0,75) + D\ (1))}{(\sum P_i)}$ Donde: M14 = menores de 14 años M65 = mayores de 65 D = discapacitados P <sub>i</sub> = suma de los pesos
Necesidades básicas insatisfechas	Adentro del área mayor a la mediana de 45 hogares con NBI: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 45 hogares con NBI: 0
Población con secundario incompleto	Adentro del área mayor a la mediana de 261 habitantes: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 261 habitantes: 0
Población sin cobertura de salud	Adentro del área mayor a la mediana de 185 habitantes: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 185 habitantes: 0
Delincuencia	Adentro del área mayor a la mediana de 108 delitos: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 108 delitos: 0

Tabla 2: Condiciones de corte de los criterios.

Fuente: : elaborado sobre la base del INDEC, 2010. Atlas Socioeconómico de San Juan, 2016. Ministerio de Desarrollo Humano y Social, 2008. Dirección de Geodesia y Catastro, 2019. Municipalidad de Sarmiento, 2023.

Crterios	Puntos de corte
Conexión a servicios básicos insuficientes	Adentro del área mayor a la mediana de 261 hogares: 1 Fuera del área mayor a la mediana de 261 hogares: 0
Escuelas	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Clubes deportivos	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
Espacios verdes	Adentro del área de 500 m: 0 Fuera del área de 500 m: 1
Centros de salud de atención primaria	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
Bomberos y puestos policiales	Adentro del área de 5 kilómetros: 0 Fuera del área de 5 kilómetros: 1

**Tabla 2:** Condiciones de corte de los criterios.

**Fuente:** : elaborado sobre la base del INDEC, 2010. Atlas Socioeconómico de San Juan, 2016. Ministerio de Desarrollo Humano y Social, 2008. Dirección de Geodesia y Catastro, 2019. Municipalidad de Sarmiento, 2023.

tores para obtener mapas compensables. Los factores corresponden a: espacios verdes, NBI, secundario incompleto, humano, densidad de población, superficie construida, hospitales, escuelas, clubes, uniones vecinales, iglesias, área servida de bomberos y policías, conexión a servicios básicos insuficientes, delincuencia y sin cobertura de salud. Analizando las funciones de pertenencias difusas y si son crecientes o decrecientes e ingresando los puntos de corte. Por ejemplo, para el caso de las rutas la función es sigmoidea creciente, a medida que nos alejamos de la ruta aumenta el riesgo. En la generación de este modelo, se debió calcular precisamente los pesos de cada factor a partir de asignarle a cada uno de ellos un nivel de importancia en base a la escala definida por Saaty, 1980. Se ha considerado el siguiente orden de importancia a los factores frente a un sismo: en primer lugar se encuentra el factor correspondiente a conexión a servicios básicos insuficientes (0,3321), seguido del factor necesidades básicas insatisfechas (0,1846), luego le siguen población con secundario incompleto (0,0753), humano (0,0559), densi-

dad poblacional (0,0448), superficie edificada (0,0379), CAPS (0,0336), área servida por el cuartel de bomberos y puestos policiales (0,0309), clubes deportivos (0,0305), escuelas (0,0301), uniones vecinales (0,0297), iglesias (0,0293), espacios verdes (0,0289), delincuencia (0,0285) y población sin cobertura de salud (0,0281). El radio de consistencia obtenido es menor de 0,10 lo que indica que los pesos son correctos es decir, que el nivel de jerarquía adoptado por el centro decisor para cada uno de los factores es óptimo. Considerando esta ponderación, se procedió a realizar el modelo decisional mediante el método de la WLC.

### 3.1 Comparación y validación de los resultados

En dicho modelo decisional intervienen hasta 15 factores espaciales relacionados con el peligro y aspectos de la exposición, fragilidad social y resiliencia de la vulnerabilidad, tomando como base los datos de diferentes fuentes secundarias. El tratamiento de los datos se llevó a cabo con un software SIG, utilizando un modelo

raster con tamaño de píxel de 100 metros de resolución. Para comprobar la validez del modelo, se utilizó el método de la sumatoria lineal ponderada como técnica de Evaluación Multicriterio, mediante la implementación de la variación en un  $\pm 25\%$  del valor a nivel de píxel de los factores y pesos utilizados en el modelo.

Los modelos finales fueron reclasificados en mapas binarios, con la finalidad de obtener la mayor información po-

sible sobre el impacto de los factores y pesos modificados en los resultados del modelo, así como para determinar el grado de robustez. 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 cuantificó con el Estadístico Kappa y Estadístico Pearson (Tabla 3).

Los resultados obtenidos revelan que los 15 factores ejecutados, donde se introducen factores y pesos con variacio-

Nombre de los factores	Pearson	kappa	Modelos de contrastes
Necesidades básicas insatisfechas	0.96	0.96	Modelo final_1: NBI
Secundario incompleto	0.97	0.97	Modelo final_2: secundario incompleto
Humano	0.96	0.96	Modelo final_3: humano
Densidad de población	0.92	0.92	Modelo final_4: densidad de población
Superficie edificada	0.91	0.90	Modelo final_5: superficie edificada
Hospital	0.93	0.93	Modelo final_6: hospital
Bomberos y Policías	0.96	0.95	Modelo final_7: bomberos y policías
Clubes	0.96	0.96	Modelo final_8: clubes
Escuelas	0.95	0.95	Modelo final_9: escuelas
Uniones vecinales	0.96	0.96	Modelo final_10: uniones vecinales
Iglesias	0.96	0.96	Modelo final_11: iglesias
Espacios verdes	0.94	0.94	Modelo final_12: espacios verdes
Sin cobertura de salud	0.94	0.94	Modelo final_13: sin cobertura de salud
Delincuencia	0.94	0.94	Modelo final_14: delincuencia
Conexión a servicios básicos insuficientes	0.95	0.95	Modelo final_15: conexión a servicios insuficiente

**Tabla 3:** Nivel de acuerdo entre el modelo original y los modelos contrastados con variación.

**Fuente:** : elaborado sobre la base del INDEC, 2010. Atlas Socioeconómico de San Juan, 2016. Ministerio de Desarrollo Humano y Social, 2008. Dirección de Geodesia y Catastro, 2019. Municipalidad de Sarmiento, 2023.

nes 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 el factor humano (0,96), iglesias (0,96), necesidades básicas insatisfechas (0,96), secundario incompleto (0,97), densidad de población (0,92), superficie construida (0,91), hospital (0,93), policías y bomberos (0,96), clubes (0,96), escuelas (0,95), uniones vecinales (0,96), espacios verdes (0,94), sin cobertura de salud (0,94), delincuencia (0,94) y conexión a servicios básicos insuficientes (0,95) influyen de manera significativa o casi perfecta en el modelo de riesgo sísmico ( $k_r$  o  $r$  entre 0,87 y 0,96). 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.

Luego de terminado el trabajo de gabinete y de haber determinado las áreas con diferentes niveles de riesgo sísmico con el método booleano de mínimo riesgo, método booleano de riesgo creciente y **método de combinación lineal ponderada continua de riesgo medio con pesos diferentes**, se procedió a hacer la comparación y validación In-situ de los resultados arrojados en dichos modelos. A continuación, se muestran algunas imágenes de las zonas relevadas (Figura 2) y el modelo con el método booleano de riesgo mínimo (Figura 3), siendo el que mejor explica el riesgo sísmico en el departamento.

En forma general se encontraron coincidencias con algunas áreas de riesgo alto entre los tres modelos presentados. Aun así, el método de WLC continuo con



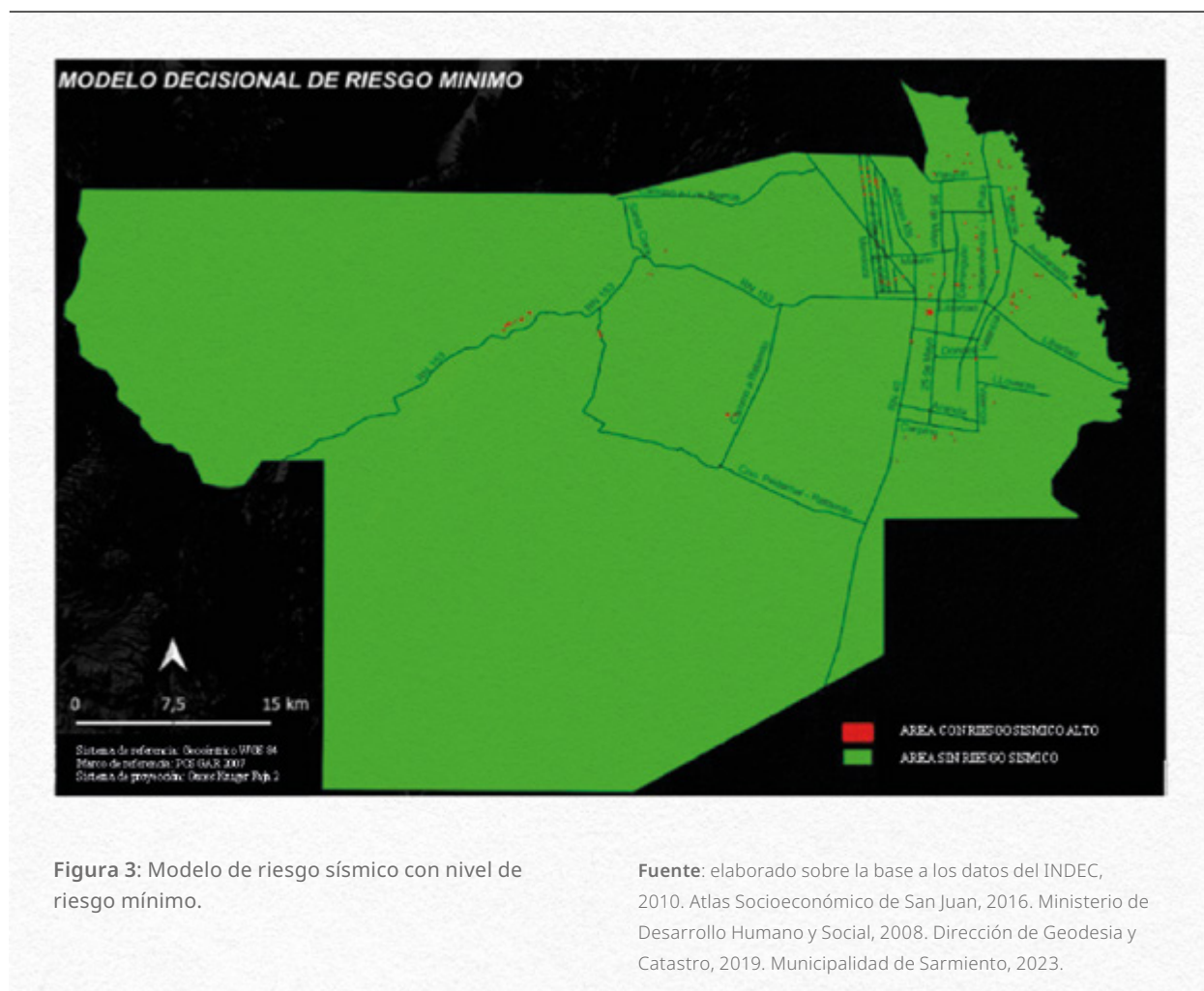
Figura 2: Modelo de riesgo sísmico mínimo resultado de la comparación y constatación en el terreno.

Fuente: fotografías capturadas en el terreno en base al relevamiento realizado en septiembre 2023. Elaborado sobre la base a los datos del INDEC, 2010. Atlas Socioeconómico de San Juan, 2016. Ministerio de Desarrollo Humano y Social, 2008. Dirección de Geodesia y Catastro, 2019. Municipalidad de Sarmiento, 2023.

pesos diferentes y el método de riesgo máximo se consideraron muy generales en los resultados aportados, ya que determinan zonas con niveles altos de riesgo y que por las condiciones habitacionales y de localización observados no corresponden. Estas diferencias de resultados se dan porque realizan operaciones muy diferentes acerca de cómo deben evaluarse los criterios. En el caso de la evaluación booleana, se usa una forma muy extrema de decisiones. Si los criterios son combinados con un AND lógico (operados de intersección), una posición debe cumplir con cada criterio y todos los criterios a la vez para que esta sea incluida en el grupo de decisiones. Si aún un simple criterio no se cumple, la posición será excluida. Por otra parte, si se usa un OR (unión) lógico, ocurre lo contrario una posición será incluida en el grupo de decisiones si solo un único criterio pasa la prueba. Esta es una estrategia bastante especuladora, con un riesgo incluido (aparente-

mente) sustancial. Comparando estas estrategias con respecto a las representadas por la combinación lineal ponderada (WLC), en esta última, los criterios pueden intercambiar sus cualidades. Una cualidad muy pobre puede ser compensada con un número de cualidades muy favorables.

Este modelo decisional diseñado con el método de riesgo mínimo representa dos áreas opuestas con riesgo alto y sin riesgo. Dicha localización se muestra de forma puntual y precisa. El área con riesgo alto corresponde a las alternativas que obtuvieron valores desfavorables en la superposición algebraica de las capas binarias de cada uno de los criterios considerados. Es decir que todos los píxeles de los factores considerados tienen riesgo alto (1) en los píxeles. Es decir, que son vulnerables frente al peligro sísmico porque presentan edificaciones precarias, valor alto en el indicador





humano (población mayores de 65 años, menores de 14 años y discapacitados), necesidades básicas insatisfechas, edad de las construcciones anteriores a 1944, conexión a servicios básicos insuficientes, alta delincuencia, población con secundario incompleto, escuelas a más de 500 m, clubes a más de 500 m, CAPS a más de 500 m, iglesias a más de 500 m, rutas a más de 500 m, espacios verdes a más de 500m, área servida de bomberos y policías mayor de 5 kilómetros, zonas con alta licuefacción y aceleración del suelo y con frecuencia alta de epicentros.

La localización de esta área se encuentra dispersa en el departamento y mostrando una prevalencia en el sector Norte. Esta zona se ubica en las cercanías de la Villa Cabecera del departamento, siendo las localidades más pobladas. Las zonas corresponden específicamente a los polígonos de las Figuras 2 y 3:

- Polígono 1: viviendas ubicadas en Pedernal aproximadamente a 659 m en un callejón sin nombre, que intercepta a la ruta nacional 153.
- Polígono 2: viviendas ubicadas en Divisadero aproximadamente a 700 m de la ruta nacional 153.
- Polígono 3: viviendas ubicadas en Los Berros, aproximadamente a 1500 m en un callejón sin nombre que intercepta a la ruta nacional 153.
- Polígono 4: Viviendas del asentamiento irregular ubicado en Guanacache aproximadamente a 800 m de la ruta camino a Retamito.
- Polígono 5: Viviendas ubicadas en Tres Esquinas. En la zona de calle Carpino y calle Tres Esquinas.
- Polígono 6: Viviendas ubicadas en Media Agua. Entre las calles Malvinas Argentinas e Islas Malvinas. Y viviendas entre la zona de Juan XXIII y 3 de Julio.
- Polígono 7: Viviendas ubicada en Punta del Médano entre calle Alfonso XIII y calle Navarro. Y entre la calle Mendoza y calle Navarro.
- Polígono 8: Viviendas ubicadas en Cochagual en la zona de calle Yanzon y 25 de Mayo.
- Polígono 9: Asentamiento ubicado en Cochagual en la calle Valencia entre calle Libertad y Avellaneda.

En contraposición el área sin riesgo es la que domina en extensión y se caracteriza por obtener valores favorables (0) en la superposición del producto de todas las imágenes booleanas de los factores. Esta área se caracteriza principalmente por ser despoblada. Por esta razón, presentan las zonas valores favorables (0) frente a un sismo en el mapa binario de cada una de las variables.

#### 4. CONCLUSIÓN

En el modelado del riesgo sísmico se integraron diferentes criterios correspondientes al peligro y también a la vulnerabilidad con diferentes dimensiones (económicas, sociales, habitacionales, educativas, humanas, peso poblacional e instalaciones vitales, entre otros). Estos, fueron integrados a la unidad de análisis espacial que comprende un alto nivel de detalle en el territorio y que es el pixel (100 m de resolución). De este modo se estimó el riesgo sísmico en forma integral en el departamento Sarmiento, destacando el carácter multicausal de la Geografía.

Como punto de partida para aplicar una metodología EMC-SIG enmarcada en el paradigma de la decisión multicriterio, fue fundamental la construcción de la base de datos geográficos confiable para su posterior tratamiento. Enfatizando en el análisis de la calidad del dato del conjunto de criterios que comprende el peligro y la vulnerabilidad seleccionados en base a la revisión bibliográfica de diferentes investigaciones consultadas. Dichos criterios fueron convertidos en capas temáticas y superpuestas mediante operaciones logradas con la combinación de técnicas estadísticas y Sistemas de Información Geográfica. Dichas técnicas comprenden las compensatorias de combinación lineal ponderada con pesos diferentes y las técnicas no compensatorias de riesgo mínimo y riesgo creciente.

La comparación de los diferentes modelos de riesgo y la validación con el análisis In-situ realizado mediante la observación directa en el terreno y el Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial permitió obtener los factores más influyentes en los resultados del modelo con el índice Pearson y Kappa. Se determinaron el grado de acuerdo/ desacuerdo entre los mapas binarios del modelo original y los obtenidos introduciendo los factores y pesos con variación a nivel de pixel.

De esta manera los métodos de validación comprobaron que el modelo elaborado con la técnica de riesgo mínimo aporta los resultados más confiables en cuanto

a precisión y exactitud del riesgo sísmico en el departamento de Sarmiento. Asimismo, se debe destacar que esta ecuación cumple con la operación elemental de la multiplicación de los componentes que define al riesgo.

Finalmente se determinó que los resultados obtenidos del AS han demostrado que las soluciones iniciales del modelo de riesgo sísmico son robustas, 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. Los resultados del análisis espacial realizado destacan el método de riesgo mínimo como el que mejor se ajusta a la realidad del riesgo sísmico y delimitando áreas contrapuestas, muy representativas y claras para la gestión del riesgo.

En síntesis, el modelo de riesgo sísmico generado, representa la localización del área con riesgo alto, ubicada en el Norte preferentemente y en forma dispersa, siendo estas áreas las que tienen la posición desfavorable en cada alternativa de los criterios procesados, frente a un sismo. Opuesto, el área sin riesgo es la que domina en extensión en el departamento y habiendo conseguido valores favorables en cada uno de los factores y restricciones evaluados. Este mapa es muy valioso por la rigurosidad con la que fue elaborado y en consecuencia, la precisión de la información que brinda para la mitigación del riesgo.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Aneas, S.; Cattapan, S.; Torres E. Pelegrina, C. (2011).** *El hombre frente a los riesgos del ambiente*. San Juan. Editorial Universidad Nacional de San Juan.
- Atlas Socioeconómico de la provincia de San Juan, (2016).** Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan.
- Barredo, J. (1993).** *Sistema de información geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid. Editorial RA-MA. España.
- Cardona, O. (2001).** *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis doctoral. Recuperada desde: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93531/01Portadas.PDF>
- Dirección de Geodesia y Catastro de la Provincia de San Juan (2016).** República Argentina.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica. INPRES (1989).** *Microzonificación Sísmica del Valle de Tulum. Provincia de San Juan. República Argentina*. Poder Ejecutivo Nacional. Ministerio de Obras y Servicios Públicos. Secretaria de Obras Públicas.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (2010)** Disponible en: <http://www.indec.gov.ar/>
- Masure (1996-1999)** Urban System Exposure (USE). *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Barcelona.
- Ministerio de Desarrollo Humano y Promoción Social (2008 a 2009).** Provincia de San Juan. República Argentina.
- Municipalidad de Sarmiento 2023.** Provincia de San Juan
- Landis, R. y Koch, G. (1977).** La medición del acuerdo de observador de datos categóricos. *Revista Sociedad Biométrica Internacional* (33,1). Recuperado de: <https://www.jstor.org/stable/2529310>
- Lilburne, L. y Taranola, S. (2009).** Análisis de sensibilidad de los modelos espaciales. *Revista Internacional de la Información Geográfica* (23,2). <https://doi.org/10.1080/13658810802094995>
- Perucca, L. Perez, A. y Navarro, C. (2006).** Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (61, 4). Recuperado desde: <file:///C:/Users/User/Downloads/1355-PDF%20combinado-4468-1-1020210603-1.pdf>
- Rashed, T. y Weeks, J. (2003)** Metodología SIG para el análisis de la vulnerabilidad sísmica. Ciudad de Los Ángeles. Recuperado desde: [https://www.researchgate.net/publication/209805132\\_Assessing\\_Vulnerability\\_to\\_Earthquake\\_Hazards\\_through\\_Spatial\\_Multicriteria\\_Analysis\\_of\\_Urban\\_Areas](https://www.researchgate.net/publication/209805132_Assessing_Vulnerability_to_Earthquake_Hazards_through_Spatial_Multicriteria_Analysis_of_Urban_Areas)
- Saaty, T. (1980).** *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. New York, McGraw Hill.
- Wilches-Chaux, G. (1993).** *La vulnerabilidad global*. En Maskrey, A. (comp). *Los desastres no son naturales*. LA RED. Colombia. pp. 11-41.