

# **ANÁLISIS ESPACIAL DE SISMOS EN LOS CANTONES DE COSTA RICA DURANTE EL PERIODO 2010-2022**

**Camila Aguilar<sup>1</sup>, Brenda Fonseca<sup>2</sup>, Héctor Ramírez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Estadística, Universidad de Costa Rica

<sup>2</sup> Ingeniera Industrial, Universidad Costa Rica

<sup>3</sup> Ingeniero en Producción Industrial, Tecnológico de Costa Rica

## **Resumen**

Costa Rica es uno de los países que se encuentra en una zona tectónicamente activa, lo que lo hace propenso a eventos sísmicos de magnitudes altas. Esto se ha visto reflejado a lo largo de la historia ya que el país ha sufrido daños importantes como consecuencia directa de los terremotos. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de los sismos registrados desde enero 2010 a diciembre 2022 en los diferentes cantones de Costa Rica con el fin de identificar patrones de comportamiento asociados a diferentes conglomerados. Se realiza un análisis descriptivo con gráficos y mapas que me permitió comprender el comportamiento de los datos. Además, se implementó la I de Moran tanto de manera global como local para analizar la autocorrelación espacial de los datos. De este modo, a partir de la I de Moran local, fue posible detectar dos conglomerados estadísticamente significativos. El primer conglomerado (Alto-Alto) quedó integrado por 4 cantones (Santa Cruz, Hojancha, Osa y Quepos); mientras que el segundo conglomerado (Bajo-Alto) lo conforman 3 cantones (Nandayure Buenos Aires y Corredores). Se concluye que los resultados obtenidos pueden ser utilizados como insumos para un análisis con mayor nivel de desagregación, lo cual resultaría útil para las autoridades correspondientes en temas de prevención y alerta temprana.

**Palabras clave:** sismo, magnitud, autocorrelación espacial, conglomerado.

## **Introducción**

Un sismo es lo que sucede cuando dos bloques de tierra se deslizan repentinamente uno sobre el otro. La superficie donde se deslizan se llama falla o plano de falla. El lugar debajo de la superficie terrestre donde comienza el sismo se llama hipocentro, y el lugar directamente encima de él en la superficie terrestre se llama epicentro (USGS , 1989).

Los sismos se registran mediante instrumentos llamados sismógrafos. La grabación que realizan se llama sismograma. El sismógrafo tiene una base que se fija firmemente en el suelo y

un peso pesado que cuelga libremente. Cuando un sismo hace temblar el suelo, la base del sismógrafo también se sacude, pero el peso que cuelga no. En cambio, el resorte o cuerda del que cuelga absorbe todo el movimiento. Lo que se registra es la diferencia de posición entre la parte temblorosa del sismógrafo y la parte inmóvil. El tamaño de un sismo depende del tamaño de la falla y de la cantidad de deslizamiento de esta, pero eso no es algo que los científicos puedan medir simplemente con una cinta métrica, ya que las fallas se encuentran a muchos kilómetros de profundidad bajo la superficie de la tierra (USGS, 1989).

Dado lo anterior, para determinar la magnitud del sismo, es necesario utilizar los registros sismográficos realizados en los sismógrafos de la superficie de la tierra. Una línea corta y ondulada que no se mueve mucho significa un pequeño sismo, y una línea larga y ondulada que se mueve mucho significa un gran sismo. La longitud del movimiento depende del tamaño de la falla y el tamaño del movimiento depende de la cantidad de deslizamiento. El tamaño del sismo se llama magnitud, los científicos también hablan de la intensidad de las sacudidas de un sismo, y esto varía dependiendo de dónde se encuentre durante el sismo (USGS, 1989).

A veces un sismo tiene consecuencias, estos son sismos más pequeños que ocurren en el mismo lugar que el sismo más grande que sigue. Los científicos no pueden decir que un sismo es un presagio hasta que ocurre un sismo más grande. El sismo más grande se llama sismo principal, los cuales siempre tienen réplicas que se tratan de sismos más pequeños que se producen posteriormente en el mismo lugar del sismo principal. Dependiendo del tamaño del sismo principal, las réplicas pueden continuar durante semanas, meses e incluso años después del sismo principal (USGS , 1989).

Para nadie es un secreto que cuando una región es víctima de un sismo siempre trae consecuencias, si son sismos pequeños generalmente los daños físicos pueden no ser a gran escala, pero los habitantes del lugar sienten inseguridad, y cuando los sismos son grandes los daños físicos y a las personas pueden ser irreversibles. Es por esa razón que tener un registro de la ubicación y magnitud de los sismos es clave para identificar futuros comportamientos que permitan anticipar y preparar a la población para desastres naturales.

Costa Rica ha sufrido daños importantes en tiempos históricos como consecuencia directa de los terremotos. Daños ocurridos en la época preinstrumental (1638-1903) han sido bien documentados en González Víquez (1910). Los estudios sismológicos empezaron en Costa Rica en 1888 con la instalación de péndulos duplex Ewing y la producción del primer "Boletín Sismológico Nacional" en 1901. Sismos ocurridos durante las primeras décadas del presente siglo, han sido bien documentados en boletines internacionales Tristán et al. (1912); Tristán (1916) (OVSICORI-UNA, 2023).

El cuidadoso análisis de estos documentos muestra que es posible diferenciar entre los terremotos intraplaca (continental) de carácter superficial y aquellos que han ocurrido fuera de las

costas de nuestro país y que son producto del proceso de subducción (interplaca). Es importante hacer esta diferenciación a la hora de proceder a estimar el potencial sísmico futuro producto de fallamiento superficial (intraplaca) el cual podría afectar a más del 60% de la población de Costa Rica que hoy día vive en el Valle Central (OVSICORI-UNA, 2023).

Poco más de un siglo ha transcurrido desde que ocurrió en Costa Rica (Valle Central) el último terremoto con proporciones catastróficas. Este evento ocurrido el 4 de mayo de 1910 (fecha local) y que destruyera por completo la ciudad de Cartago, tuvo su origen muy probablemente a lo largo de una falla intraplaca superficial ubicada en las cercanías de dicha ciudad (OVSICORI-UNA, 2023).

Históricamente, la región central de Costa Rica ha estado sísmicamente muy activa con terremotos muy dañinos ocurridos en fallas ubicadas a lo largo de la parte sureste de la cadena volcánica central y el inicio de la cordillera de Talamanca; además de sismos de carácter superficial bien documentados han ocurrido en la región del Valle Central principalmente en dos períodos 1910-1912 y 1951-1955 (OVSICORI-UNA, 2023).

Expuesto lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar un estudio de los sismos registrados desde enero 2010 a diciembre 2022 en los diferentes cantones de Costa Rica con el fin de identificar patrones de comportamiento asociados a diferentes conglomerados.

## **Materiales y métodos**

Para llevar a cabo el presente trabajo, se utilizaron datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), los cuales fueron obtenidos a través de su página web en la sección de riesgos de sismos: Earthquake Hazards Program U.S. Geological Survey (USGS , 1989).

Las variables que se tomaron en cuenta fueron:

- 1. Fecha del evento:** Momento en el que sucede el sismo definido en año, mes día y hora.
- 2. Ubicación del evento:** Definida mediante la latitud y longitud de la ubicación del evento.
- 3. Magnitud del sismo:** Tamaño del sismo reportado por el Servicio Geológico de EE. UU, fuente oficial para definir magnitudes.

Es importante mencionar que solo se tomaron en cuenta aquellos sismos que tuvieran una magnitud de 3 o más, ya que magnitudes inferiores usualmente no son perceptibles. A partir de las coordenadas, fue posible asignar cada evento al cantón correspondiente. Una vez que cada observación contaba con la etiqueta de cantón, se generaron las variables de análisis: **cantidad total de sismos** y la **magnitud promedio** para el periodo 2010-2022 en cada cantón. Lo anterior,

permitió realizar el empate de los datos con los límites cantonales del país para realizar el análisis espacial.

Ahora bien, para poder cumplir el objetivo de la investigación se realizaron los siguientes pasos: análisis descriptivo de los datos, cálculo de la estructura de vecinos y matriz de pesos, y la estimación de la autocorrelación espacial. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los pasos mencionados anteriormente.

### ***Análisis descriptivo de los datos***

El propósito del análisis descriptivo es resumir los datos (Villarroel Peñaranda, 2002). En el presente estudio con el objetivo de obtener una primera impresión del comportamiento de la cantidad y magnitud de sismos presentados en el territorio costarricense se utilizaron mediciones de tendencia central (media aritmética o promedio, mediana) y de dispersión al comparar el mínimo y máximo. Además, se elaboraron algunos mapas de Costa Rica que permitieron observar el comportamiento espacial de los datos.

### ***Estructura de vecinos y matriz de pesos***

Con el objetivo de reconocer conglomerados o zonas con características similares según la proximidad espacial entre las áreas geográficas; y por lo tanto comprender la autocorrelación espacial. En este paso, primero se probaron cuatro métodos de estructura de vecinos: reina (vecindad de 8 celdas), torre (cuatro ubicaciones adyacentes) y k-vecinos más cercanos (KNN, por sus siglas en inglés) considerando 2 y 4 vecinos. Para el cálculo de la cantidad de observaciones en el vecindario establecido para cada ubicación se utilizó la siguiente matriz de ponderaciones o pesos (Sawada, 2009):

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{pmatrix}$$

Donde:

$n$  representa el número de ubicaciones (observaciones),

$i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) es la entrada en la fila

$j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) es la entrada en la columna

$w_{ij}$  que corresponde al par  $(i, j)$  de ubicaciones.

Seguidamente, se calculó la matriz de pesos y se probaron las estructuras W, B y S; para cada estructura de vecinos y con su respectiva prueba I de Moran.

### ***Análisis de autocorrelación espacial***

La autocorrelación espacial se encuentra basada en las ubicaciones y los valores de las entidades simultáneamente (*Cómo Funciona Autocorrelación Espacial (I de Moran Global)*—*ArcGIS Pro / Documentación*, n.d.). Con el objetivo de obtener una relación entre la cantidad de sismos y la cantidad de sismos espacialmente; y a partir de la I de Moran Global. Se realizaron cuatro clasificaciones: Alto-Alto, Alto-Bajo, Bajo-Alto, Bajo-Bajo.

Adicionalmente, se calculó el indicador de asociación espacial local (LISA) de la I de Moran: con el objetivo de identificar patrones locales en los conglomerados de autocorrelación espacial estadísticamente significativos. Las expresiones matemáticas utilizadas se presentan a continuación:

1. La I de Moran Global se define con la siguiente expresión (Anselin, 1995):

$$I = \frac{\left(\frac{n}{S_0}\right) \sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} = \frac{N}{S_0} * \frac{\sum_{i,j} w_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Dónde:

$x_i$  = el valor de la variable x en la región i

$\bar{x}$  = la media muestral de la variable x

$w_{i,j}$  = los componentes de la matriz de pesos espaciales

N = el tamaño muestral

$$S_0 = \sum_i \sum_j w_{i,j}$$

2. La I de Moran local se define con la siguiente expresión (Anselin, 1995):

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j$$

Las expresiones anteriores varían entre -1 y 1. En cuanto a su interpretación se debe tener en cuenta lo siguiente:

Un valor de  $I$  cercano a 1  $\rightarrow$  indica una autocorrelación espacial positiva

Un valor de  $I$  cercano a -1  $\rightarrow$  indica una autocorrelación espacial negativa.

Un valor de  $I$  cercano a 0  $\rightarrow$  se rechazaría la hipótesis de que exista autocorrelación espacial. En este caso tener en cuenta el siguiente contraste de la prueba de hipótesis:

$$\begin{cases} H_0: \text{"Autocorrelación espacial nula"} \\ H_1: \text{"Autocorrelación espacial no nula"} \end{cases}$$

Por último, el análisis fue realizado con el software R (R Core Team, 2022) versión 4.2.2, mediante el uso de los siguientes paquetes: spData (Bivand et al., 2023), tmap (Tennekes, 2018), readr (Wickham et al., 2023), dplyr (Wickham et al., 2023), tidyr (Wickham et al., 2023), lubridate (Grolemund y Wickham, 2011), readxl (Wickham y Bryan, 2023), ggplot2 (Wickham, 2016), rgdal (Bivand et al., 2022), RColorBrewer (Neuwirth, 2022) y tmaptools (Tennekes, 2021).

## Resultados

### *Análisis descriptivo de los datos*

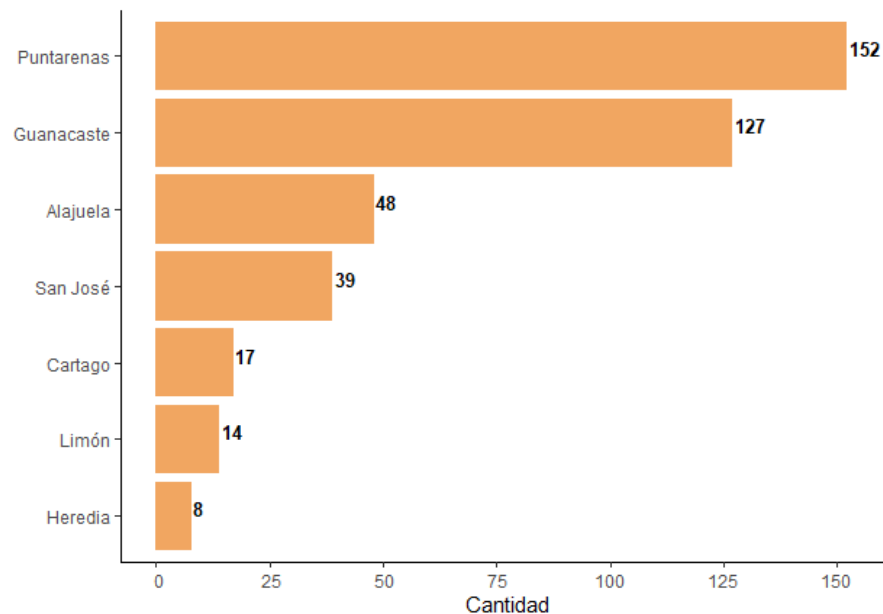
Para conocer a grandes rasgos el comportamiento de algunas de las variables anteriormente mencionadas, en la Tabla 1 se aprecia un resumen estadístico de la cantidad y magnitud de sismos presentados en el periodo 2010-2022 en el territorio de Costa Rica.

**Tabla 1.** *Costa Rica 2010-2022: Estadísticos resumen de la cantidad y magnitud de sismos presentados en el territorio*

| Variable        | Estadístico |       |         |        |
|-----------------|-------------|-------|---------|--------|
|                 | Mínimo      | Media | Mediana | Máximo |
| <b>Cantidad</b> | 0           | 7.5   | 3       | 41     |
| <b>Magnitud</b> | 0           | 4.4   | 4.4     | 5.4    |

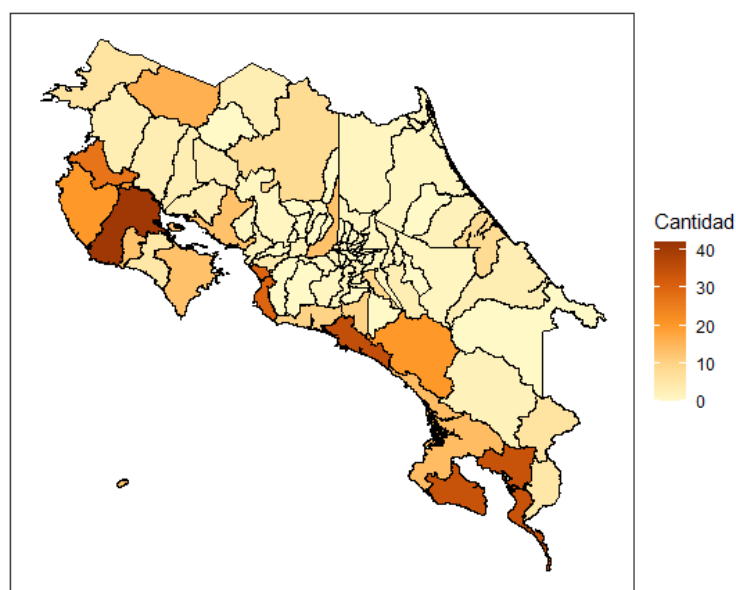
De la Tabla 1 se observa que la máxima magnitud de los sismos se encuentra en un 5.4 y la menor 4.4. En el Gráfico 1 se puede observar el desglose de la cantidad de sismos en virtud de la provincia del territorio de Costa Rica. En donde se observa que la provincia con mayor cantidad de sismos en el periodo 2010-2022 es la de Puntarenas (152), en segundo lugar, se encuentra la provincia de Guanacaste (127) y en el tercer lugar la provincia de Alajuela (48). En cuanto a las provincias con menor cantidad promedio de sismos en primer lugar se encuentra la provincia de Heredia (8), en segundo lugar, la provincia de Limón (14) y en tercer lugar la provincia de Cartago (17). Cabe destacar que en un punto medio de la cantidad de sismos promedio se encuentra la provincia de San José (39).

**Gráfico 1.** *Costa Rica 2010-2022: Cantidad total de sismos por provincia*



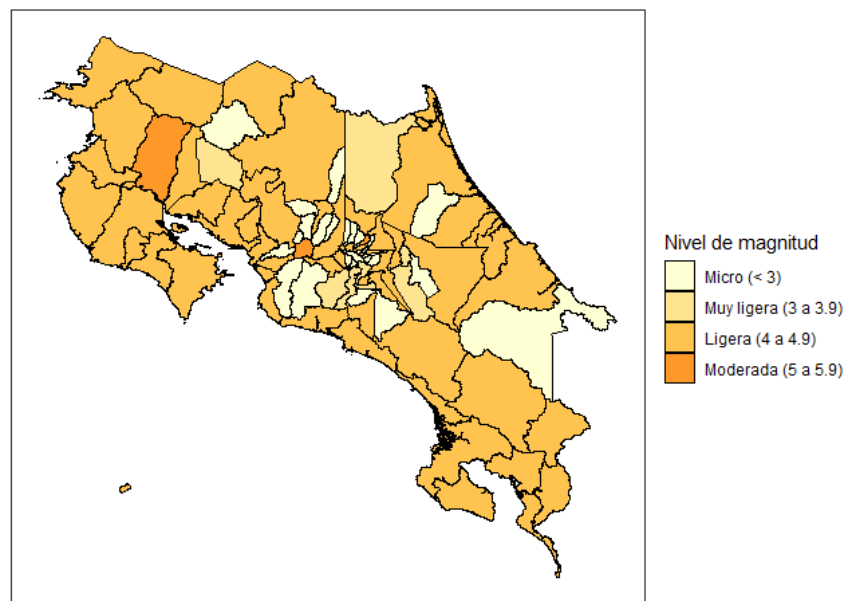
En el Mapa 1 se presenta el mapa del territorio de Costa Rica fraccionado por cantones con un diagrama de calor en donde el color más oscuro refleja el cantón del territorio costarricense en donde se presentan la mayor cantidad de sismos para el periodo 2010-2022. Mientras que el color más claro refleja los cantones con menor cantidad de sismos en dicho periodo. En primer análisis del mapa se observa que la mayor cantidad de sismos se desarrollan generalmente en las zonas sur del país con algunas pocas excepciones.

**Mapa 1.** *Costa Rica 2010-2022: Cantidad total de sismos por cantón*



En el Mapa 2 se muestra el mapa del territorio de Costa Rica fraccionado por cantones con un diagrama de calor en donde el color más oscuro refleja el cantón del territorio costarricense en donde se presentan el mayor nivel en la magnitud promedio de sismos. Mientras que el color más claro refleja los cantones con menor nivel de magnitud de sismos promedio. En análisis del mapa se observa en general el territorio costarricense en sus cantones presentan un nivel de magnitud entre ligera y muy ligera.

**Mapa 2.** *Costa Rica 2010-2022: Magnitud promedio de sismos por cantón, según nivel de magnitud*

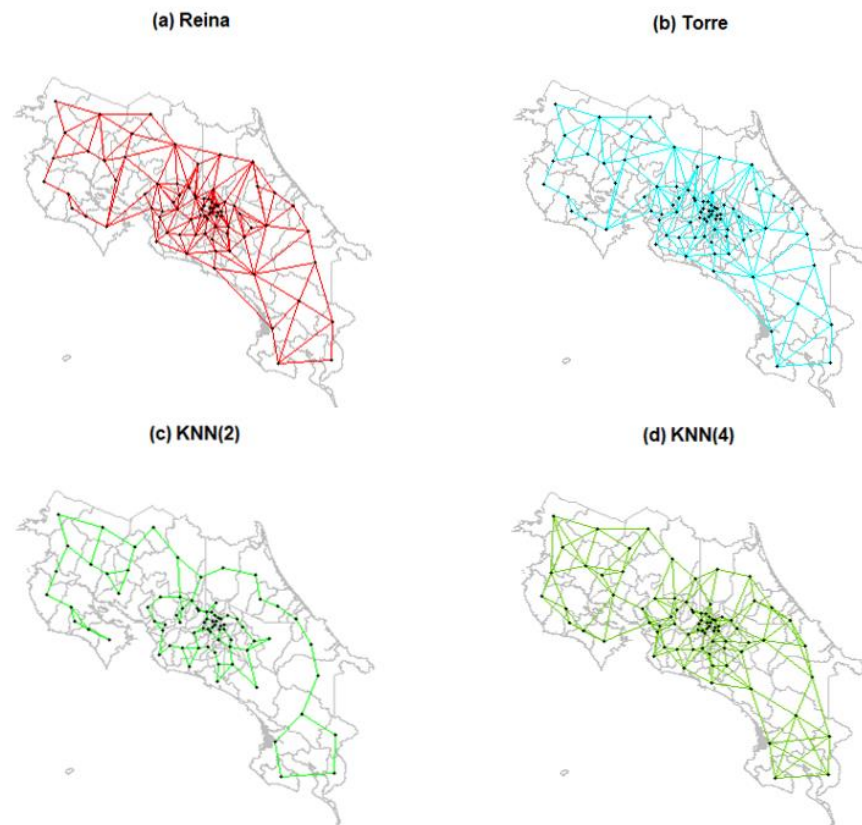


### ***Estructura de vecinos y matriz de pesos***

Para definir la estructura de vecinos y la matriz de pesos más adecuadas para los datos, se decidió probar varios métodos. Para la estructura de vecinos se trabajó con los métodos: reina, torre y k-vecinos más cercanos (KNN, por sus siglas en inglés) considerando 2 y 4 vecinos; mientras que para la matriz de pesos se probaron las estructuras W, B y S. Lo anterior, da como resultado 12 posibles combinaciones de métodos para definir la estructura de vecinos y matriz de pesos. En el Gráfico 2 se muestran las diferentes estructuras de vecinos generadas por los distintos métodos empleados: reina, torre y KNN (con 2 y 4 vecinos, respectivamente).



**Gráfico 2.** Estructura de vecinos según método



**Tabla 2.** Valores  $p$  asociados a la prueba  $I$  de Moran según estructura de vecinos y matriz de pesos

| Estructura de vecinos | Matriz de pesos |             |             |
|-----------------------|-----------------|-------------|-------------|
|                       | W               | B           | S           |
| Reina                 | $p < 0.001$     | $p < 0.001$ | $p < 0.001$ |
| Torre                 | $p < 0.001$     | $p < 0.001$ | $p < 0.001$ |
| KNN (2)               | 0.002           | 0.003       | 0.003       |
| KNN (4)               | $p < 0.001$     | $p < 0.001$ | $p < 0.001$ |

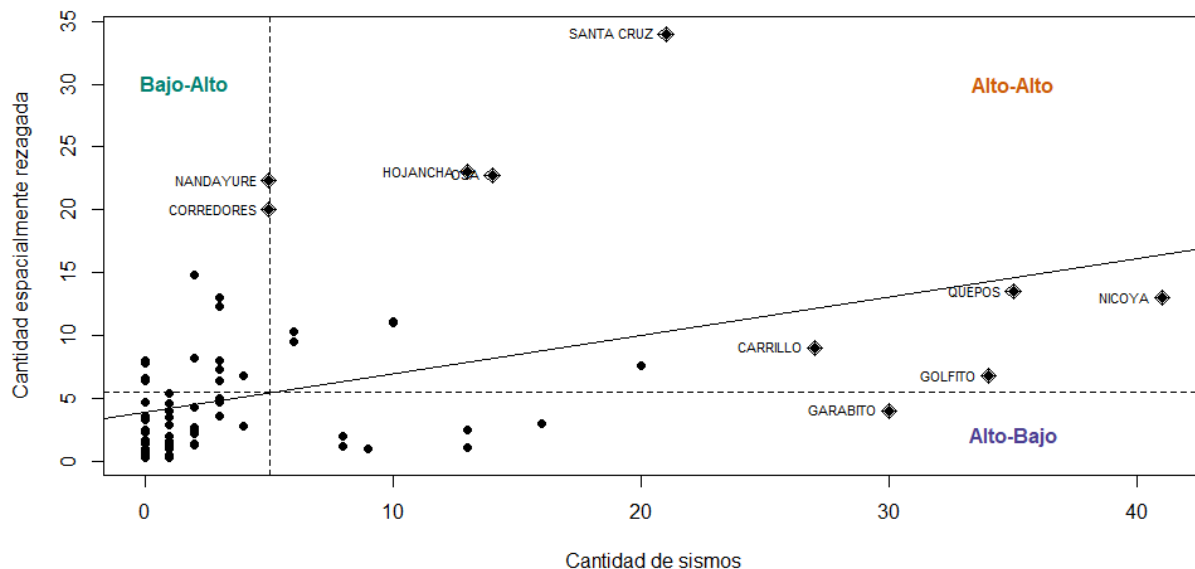
Al analizar la Tabla 2, se observa que en todos los casos se rechaza la hipótesis de no autocorrelación espacial. Lo anterior quiere decir que, sin importar la estructura de vecinos y la matriz de pesos que se utilice, la cantidad de sismos presentada en Costa Rica durante el periodo 2010-2022 posee autocorrelación espacial. Cabe aclarar que, como se llegó a la misma conclusión con las diferentes combinaciones, se decidió seguir trabajando con el método reina para la estructura de vecinos y con la matriz de pesos W ya que son los parámetros por defecto en las funciones `poly2nb` y `nb2listw` del paquete `spdep` del software estadístico R.

### ***Análisis de autocorrelación espacial***

Primero, se analizó la relación entre la cantidad de sismos y la cantidad de sismos espacialmente rezagada a partir de la I de Moran global (Gráfico 3) y se encontró lo siguiente:

- En el cuadrante I (*Alto-Alto*) se posicionan cantones que presentaron una alta cantidad de sismos y están rodeados de cantones vecinos que también presentaron una alta cantidad de sismos.
- En el cuadrante II (*Bajo-Alto*) se encuentran los cantones que tienen una baja cantidad de sismos, pero están rodeados de cantones que tiene una alta cantidad.
- En el cuadrante III (*Bajo-Bajo*), se ubican los cantones que presentaron una baja cantidad y los rodean cantones que también presentaron una baja cantidad de sismos.
- En el cuadrante IV (*Alto-Bajo*), se ubican aquellos cantones con una cantidad alta de sismos que se encuentran rodeados de cantones vecinos con una baja cantidad de sismos.

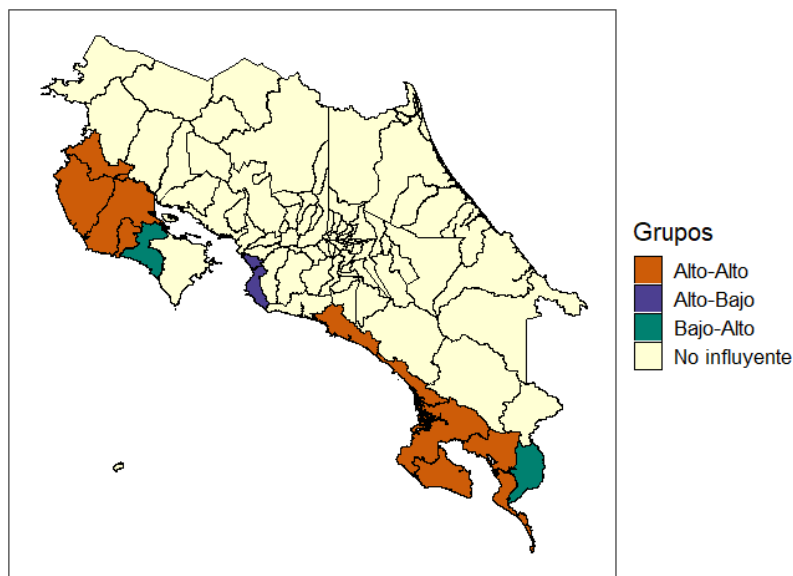
**Gráfico 3.** *Relación entre la cantidad de sismos y la cantidad de sismos espacialmente rezagada a partir de la I de Moran global*



En esta misma línea, es importante mencionar que en grupo Alto-Alto se encuentran 12 cantones (Tarrazú, Pérez Zeledón, Nicoya, Santa Cruz, Carrillo, La Cruz, Hojancha, Osa, Quepos, Golfito, Coto Brus y Parrita); en el grupo Bajo-Alto se posicionan 14 cantones (Turrubares, Dota, Orotina, Los Chiles, Guatuso, Liberia, Bagaces, Abangares, Nandayure, Esparza, Buenos Aires, Corredores, Limón y Talamanca); en el grupo Alto-Bajo se ubican 7 cantones (Alajuela, San Carlos, Upala, El Guarco, Puntarenas, Garabito y Matina); y los restantes 48 cantones se ubican el grupo Bajo-Bajo.

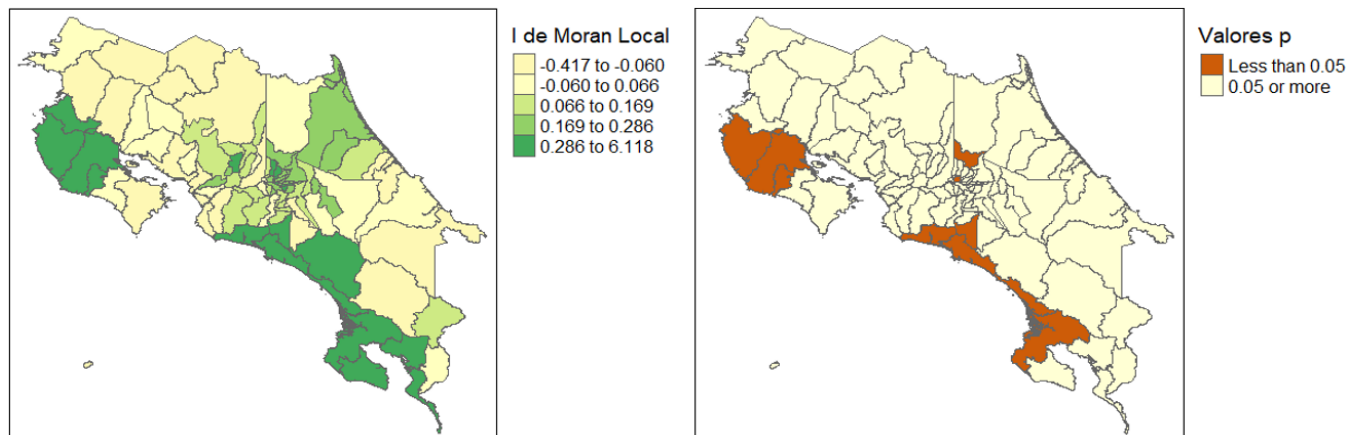
Ahora bien, a partir de la relación entre la cantidad de sismos y sus valores espacialmente rezados es posible obtener cuáles son los cantones más influyentes en la conformación de cada uno de los grupos. Como se muestra en el Mapa 3, para el grupo Alto-Alto los cantones influyentes en la conformación son Nicoya, Santa Cruz, Carrillo, Hojancha, Osa, Quepos y Golfito. Mientras que en el grupo Bajo-Alto los cantones que influyen en la conformación son Nandayure y Corredores; y en grupo en el grupo Alto-Bajo el canto influyente es Garabito.

**Mapa 3.** Cantones influyentes en cada grupo de la relación entre la cantidad de sismos y sus valores espacialmente rezados a partir de la I de Moran global



Seguidamente, se procedió a calcular el indicador de asociación espacial local (LISA, por sus en inglés) de I de Moran. En el Gráfico 4 se muestran el indicador I de Moran local obtenido para cada uno de los cantones, así como sus valores p asociados.

**Gráfico 4.** Indicadores de asociación espacial local (LISA) para la cantidad de sismos

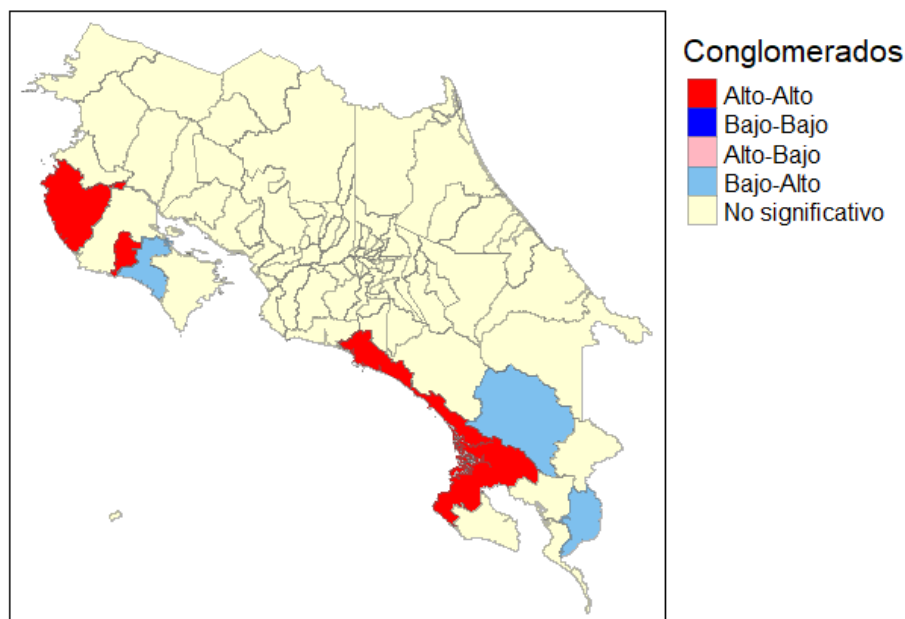


En cuanto a la I de Moran local, se encuentra que 22 cantones toman valores negativos, donde los valores más bajos están asociados a Alajuela, Buenos Aires, Garabito, Upala Puntarenas, Liberia, El Guarco y Turrubares (oscilan entre -0.42 y -0.20). En contraste, los restantes 59 cantones presentaron valores positivos para la I de Moran local con valores entre 0 y 6.12, siendo Santa Cruz, Nicoya, Quepos, Osa, Hojancha y Carillo los cantones con valores más altos.

Aunado a lo anterior, con la I de Moran local es posible contrastar la hipótesis nula de no autocorrelación de manera local. De este modo, en el Gráfico 4 se puede observar que la hipótesis nula se rechaza en 8 cantones (Santa Cruz, Osa, Hojancha, Quepos, Parrita, Nicoya, Tarrazú y Heredia); lo que quiere decir que se está presentando autocorrelación positiva en dichos cantones.

Además de los resultados anteriores, la I de Moran local también permite identificar conglomerados espaciales. Previamente, con la I de Moran global se encontraron posibles agrupaciones espaciales donde fue posible identificar cantones influyentes en cada uno de los grupos. Sin embargo, la I de Moran local permitió detectar conglomerados estadísticamente significativos y los resultados se muestran en el Mapa 4. De este modo, el análisis arrojó la conformación de dos conglomerados. El primer conglomerado (Alto-Alto) quedó integrado por 4 cantones (Santa Cruz, Hojancha, Osa y Quepos); mientras que el segundo conglomerado (Bajo-Alto) lo conforman 3 cantones (Nandayure Buenos Aires y Corredores).

**Mapa 4.** *Conglomerados espaciales estadísticamente significativos obtenidos a partir de la I de Moran local*



## Conclusiones

- Se puede observar que la magnitud de los sismos en Costa Rica tiene un promedio de 4.4 que es una magnitud ligera para la mayoría de las provincias donde se presentan la mayor cantidad de sismos.
- La provincia con mayor cantidad de sismos en el periodo 2010-2022 es la de Puntarenas (152), en segundo lugar, se encuentra la provincia de Guanacaste (127) y en el tercer lugar la provincia de Alajuela (48).
- Las provincias con menor cantidad promedio de sismos en primer lugar se encuentra la provincia de Heredia (8), en segundo lugar, la provincia de Limón (14) y en tercer lugar la provincia de Cartago (17).
- Los cantones más influyentes en la conformación de cada uno de los grupos según la relación entre la cantidad de sismos y la cantidad de sismos espacialmente rezagada a partir de la I de Moran global, para el grupo Alto-Alto los cantones influyentes en la conformación son Nicoya, Santa Cruz, Carrillo, Hojancha, Osa, Quepos y Golfito. Mientras que en el grupo Bajo-Alto los cantones que influyen en la conformación son Nandayure y Corredores; y en grupo en el grupo Alto-Bajo el canto influyente es Garabito.
- La I de Moran local permitió detectar conglomerados estadísticamente significativos, el primer conglomerado (Alto-Alto) quedó integrado por 4 cantones (Santa Cruz, Hojancha, Osa y Quepos); mientras que el segundo conglomerado (Bajo-Alto) lo conforman 3 cantones (Nandayure Buenos Aires y Corredores).
- Para futuras investigaciones, la detección de estos conglomerados puede emplearse como insumo para realizar un análisis con un mayor nivel de desagregación. Por ejemplo, detectar cuáles han sido los poblados más afectados económicamente a causa de sismos en los conglomerados obtenidos. Lo anterior, resultaría útil para las autoridades correspondientes en temas de prevención y alerta temprana.

## Bibliografía

- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- ArcGIS Pro | Documentación. (n.d.). *Cómo funciona Autocorrelación espacial (I de Moran global)*. Consultado 10, 2023, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>.

- Bivand, R., & Piras, G. (2015). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. URL: <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>
- Bivand, R., Pebesma, E., y Gomez-Rubio, V. (2013). Applied spatial data analysis with R, Second edition. Springer-Verlag. URL: <https://asdar-book.org/>.
- Bivand, R., Keitt, T y Rowlingson, B. (2022). rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.5-32. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- Grolemund, G., y Wickham, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. Journal of Statistical Software, 40(3), 1-25. URL: <https://www.jstatsoft.org/v40/i03/>
- Neuwirth, E. (2022). RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. R package version 1.1-3.
- OVSICORI-UNA. (2023). Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica universidad nacional. Obtenido de <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/sismologia/sismicidad-historica>
- Pebesma, E., y Bivand, R. (2023). Spatial Data Science: With Applications in R. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- R Core Team (2022). R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- Sawada, S. (2009, November 23). Global Spatial Autocorrelation Indices—Moran's I, Geary's C and the General Cross-Product Statistic. <http://www.lpc.uottawa.ca/publications/moransi/moran.htm>
- Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. Journal of Statistical Software. <https://doi.org/10.18637/jss.v084.i06>
- Tennekes, M. (2021). tmaptools: Thematic Map Tools. R package version 3.1.2. URL: <https://github.com/r-tmap/tmaptools>, 2(1), 110–115.
- USGS. (U.S. Geological Survey Circular 1050 de 2023 de 1989). Science for a Changing World. Obtenido de Earthquakes: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Villarroel Peñaranda, L. A. (2002). Rol de la Estadística Aplicada en Investigación Científica. Acta Nova
- Bivand, R., Nowosad, J. y Lovelace, R. (2023). spData: Datasets for spatial analysis. URL: <https://jakubnowosad.com/spData/>
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.

Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., y Vaughan, D. (2023). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. URL: <https://dplyr.tidyverse.org>

Wickham, H., Hester, J. y Bryan, J. (2023). readr: Read Rectangular Text Data. URL: <https://dplyr.tidyverse.org>

Wickham, H., Vaughan, D., y Girlich, M. (2023). tidyr: Tidy Messy Data. URL: <https://tidyr.tidyverse.org>

Wickham, H., y Bryan, J. (2023). readxl: Read Excel Files. R package version 1.3.1. URL: <https://readxl.tidyverse.org>