

ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS SISMOS EN COSTA RICA, 2010-2019

Moisés Coto Hernández
Melissa Valverde Hernández
Universidad de Costa Rica

RESUMEN

En el presente estudio se realiza un análisis estadístico espacial de los sismos en Costa Rica en el periodo 2010-2019. El objetivo del estudio consiste en observar si la magnitud, aceleración y profundidad de los sismos tienen una distribución y una estructura de modelo espacial lineal en el territorio nacional. Se utilizan los datos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), de la Universidad de Costa Rica (UCR). El procedimiento estadístico utilizado consistió en realizar un análisis espacial mediante geoestadística, donde se plantean tres modelos lineales espaciales nulos con la profundidad, la aceleración y la magnitud de los sismos, y un modelo de la magnitud con la aceleración. Además, para el análisis de las correlaciones entre variables se estima un modelo lineal de corregionalización usando CoKriging. Se concluye que las variables de los sismos presentan una distribución espacial y estructura de modelo lineal espacial en el territorio.

INTRODUCCIÓN

“Un sismo consiste en la manifestación superficial de la liberación de energía interna del planeta, transmitida en ondas sísmicas” (Vallejos et al, 2012).

Costa Rica es un país altamente sísmico, se ve afectado por dos placas tectónicas, que son la Caribe y la del Coco. La placa del Coco se hunde (subduce) bajo la placa Caribe y durante este proceso es que se generan la mayoría de los sismos que nos afecta.

Este escenario general, también define dos tipos de sismos, los de interplaca y los de intraplaca. Los primeros ocurren en las zonas de choque de estas placas, como por ejemplo el sismo del Golfo de Papagayo en 1916, el de Osa Golfito en 1983 y en general los que han ocurrido frente a las costas de Garabito, Parrita y Aguirre, estos eventos aunque de magnitudes importantes, suelen ocurrir lejos de centros de población, sin embargo cuentan con capacidad de generar daños.

Los sismos de intraplaca, se generan dentro de las placas tectónicas, han ocurrido con mayor frecuencia en la historia sísmica del país, su magnitud en promedio es menor con relación a los eventos de interplaca, no los excluye de ser los que han generado mayores pérdidas materiales y humanas, principalmente por su cercanía a centros de población. Ejemplos de

este tipo de sismos tenemos: terremotos del Tablazo y Santa Mónica en 1910, Patillos en 1952, Toro Amarillo en 1955, Tilarán en 1973, Pérez Zeledón 1983, Puriscal 1990, Cinchona 2009.

Se procedió a revisar antecedentes sobre la aplicación de la técnica espacial geoestadística en sismos, en el 2018, Salvador Huertas Amorós, realizó un análisis estadístico clásico y robusto de datos espaciales, en donde mediante variogramas y el Kriging Ordinario de la sismicidad de la península Ibérica, utilizando el paquete R.

Sánchez, L. et all (2017) escribieron sobre la “Estimación global de la macrosismisidad en los Municipios del Departamento de Antioquia”, donde utilizan la técnica geoestadística para estimar la amenaza macrosísmica de cada uno de los municipios de Antioquia en Colombia, dentro de sus resultados obtenidos indican que existen por lo menos siete municipios en peligro eminente.

Lorenzo J. (2017), presentó su documento: Volcanes, terremotos y matemáticas, donde mencionan que análisis espacial de campos geofísicos, supuestos estacionarios o no, tiene su origen en una disciplina multidisciplinaria: la Geoestadística, además de distintas técnicas para el desarrollo de la geoestadística en el campo sísmico.

Gonzalez J. (2018), Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmica de refracción somera en la isla de barrera de la Laguna de Unare, Estado Anzoátegui. Venezuela tiene el objetivo de evaluar la eficacia de la sísmica somera, apoyada en la geología y la geoestadística, para determinar la potencial ocurrencia de licuación de suelos en una zona particular.

Una vez definidos los conceptos anteriores y debido a la importancia que tiene este tema, en la sociedad costarricense surge la necesidad de conocer la distribución espacial de los sismos en el país, en particular la geoestadística.

MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo de esta investigación consiste en observar si la magnitud de los sismos tiene una estructura de modelo lineal, para poder predecirlos en el territorio nacional.

Para el desarrollo de la investigación se obtienen los datos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, de la Universidad de Costa Rica, correspondiente a los sismos reportados en Costa Rica, en los años 2010-2019, los cuales estaban georeferenciados en longitud y latitud y que cuenta con las siguientes variables

Tipo de sismo: tiene que ver con la intensidad de cada uno, cuando ocurre un sismo fuerte que haya producido aceleraciones sensibles en al menos 30 estaciones, se genera un informe automático, Si el sismo no es lo suficientemente fuerte para producir aceleraciones sensibles en al menos 30 acelerógrafos, se crea un informe manual.

Tiempo CR: corresponde a la hora en el territorio costarricense

Tiempo UTC: corresponde al “Tiempo Coordinado Universal”, que en Costa Rica significa que se le deben sumar 6 horas a la habitual.

Latitud y Longitud: corresponden a la localización del sismo en el territorio nacional

Profundidad: se mide en km y se relaciona con la superficialidad de los sismos, entre más profundo más puntos de sensación del sismo, pero con menos magnitud, a menos profundidad más sensación del sismo, pero más localizado en un lugar.

Magnitud: es la liberación de energía en un sismo, se mide en MW. La magnitud de un sismo es una medida de su tamaño, es un dato objetivo, es decir, es el mismo en cualquier parte del mundo donde se calcule.

Aceleración: se relaciona directamente con la fuerza que causa que un cuerpo cambie de posición o velocidad. En sismología, la aceleración del suelo que produce un sismo se mide comúnmente como "g". Un "g" es el valor de la aceleración de la gravedad terrestre ($1g = 980 \text{ cm/s}^2$).

Con las variables a utilizar, se realiza la distribución espacial de los sismos en el territorio nacional, así como la densidad de los mismos en el territorio nacional, seguido a ello se plantean cuatro modelos geoespaciales, los primeros tres, son modelos nulos para las variables: magnitud, profundidad y aceleración, y un cuarto que tiene que ver con la magnitud y la aceleración, para ello se plantearon los respectivos variogramas, y el objetivo es conocer cuál es el que mejor modelo que se ajusta a los datos de los sismos. Además, con respecto al análisis de las correlaciones entre variables se estima un modelo lineal de corregionalización usando CoKriging.

Para este análisis estadístico se utilizó el lenguaje estadístico R versión 3.6.1, algunas de las librerías utilizadas fueron: sp, Rgdal, raster, spatstat, dplyr y maptools.

RESULTADOS

Según la Figura 1, se observa varias nubes de puntos, donde pareciera que los sismos se encuentran distribuidos uniformemente en el espacio, y estas nubes o concentraciones concuerdan con el choque de placas Caribe y la del Coco, en donde la placa del Coco se hunde (subduce) bajo la placa Caribe y durante este proceso es que se generan la mayoría de los sismos en el territorio nacional. Se destaca que, en la zona sur del país, Punta Burica, parte del área central y en la provincia de Guanacaste, se identifican una mayor cantidad de sismos.

Posteriormente se realiza un cálculo de la densidad espacial de los sismos en el territorio nacional, en la Figura 2, se visualiza la densidad de los sismos. Las mayores magnitudes de densidad presentan en el pacífico central del país, llegando a la zona central del país.

Figura 1. Distribución de los sismos en el territorio marítimo y terrestre de Costa Rica, 2010-2019

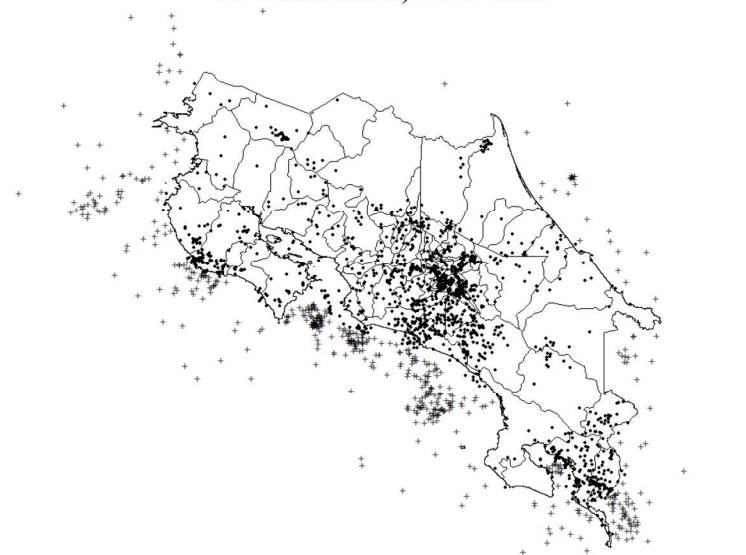
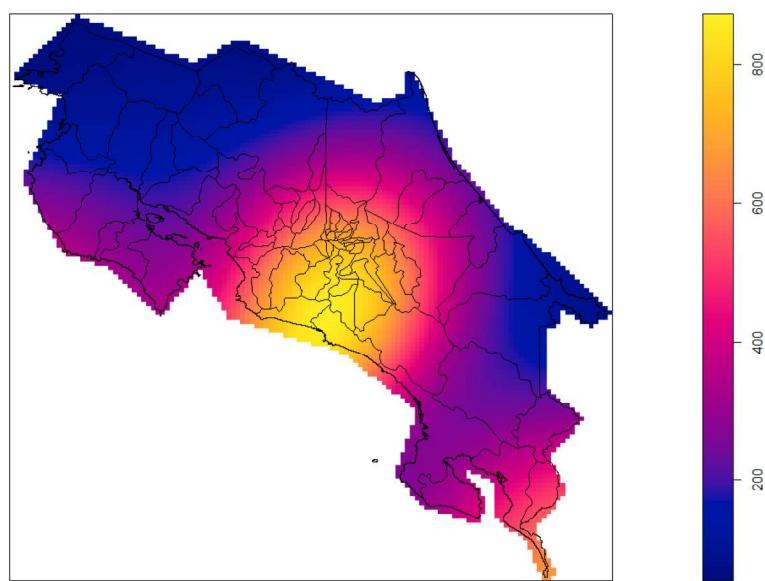


Figura 2. Densidad espacial de los sismos en el territorio terrestre de Costa Rica, 2010-2019



Inicialmente a las variables se les aplica una transformación logarítmica para minimizar la variabilidad y estabilizar el comportamiento. En la figura 3 podemos observar cómo se distribuyen los sismos por las variables magnitud, profundidad y aceleración, el cual no es uniforme en toda su longitud, en la figura 4, se presente la magnitud del sismo explicada por la profundidad del mismo, del cual podemos extraer que no hay relación lineal en las variables.

Figura 3. Distribución de los sismos en el territorio terrestre según magnitud, profundidad y aceleración. Costa Rica, 2010-2019

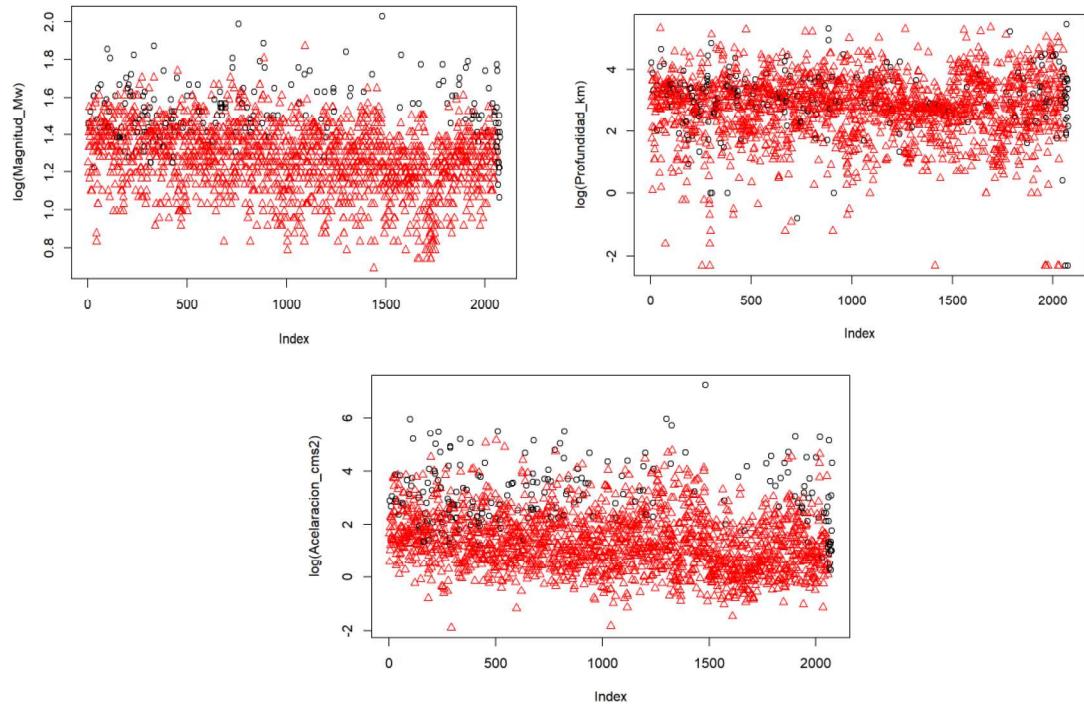


Figura 4. Distribución de los sismos en el territorio terrestre según magnitud y profundidad Costa Rica, 2010-2019

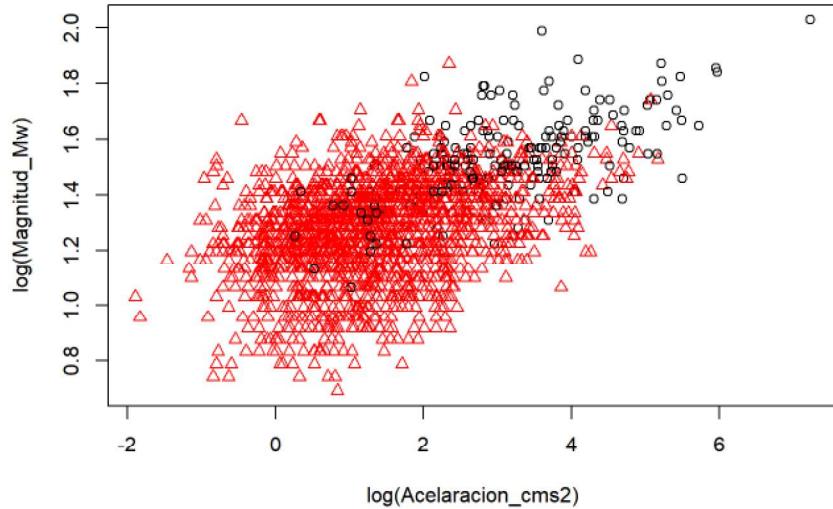
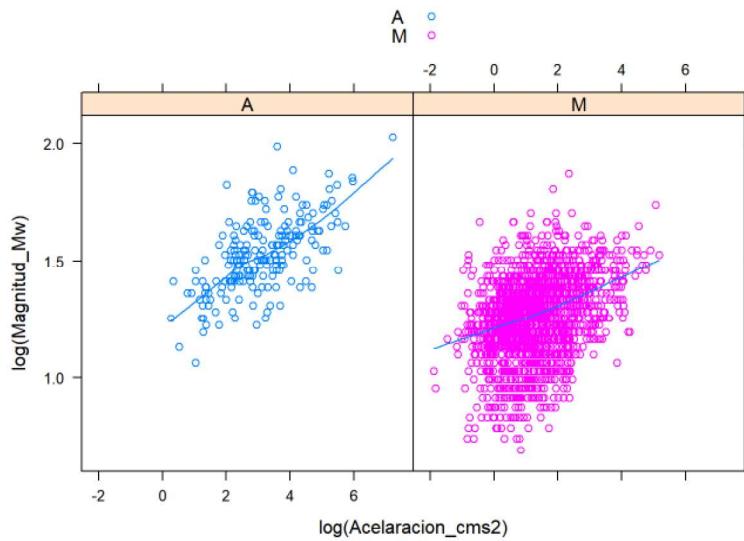


Figura 5. Asociación entre la magnitud y aceleración de los sismos por tipo de informe, Costa Rica, 2010-2019



Como se observa en figura 5 existen una leve relación lineal entre la magnitud y la aceleración lo siguiente es plantear los 3 modelos nulos, y el de magnitud-aceleración

Modelo Nulo Magnitud

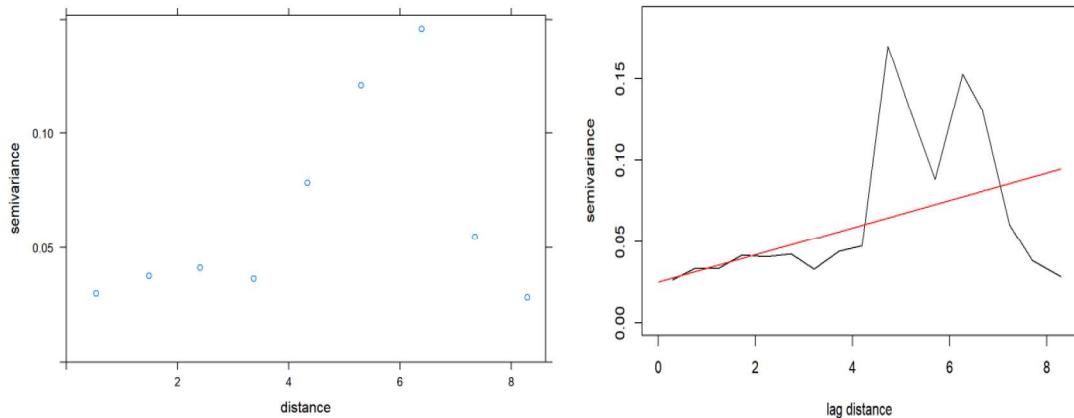
Primero se plantea el modelo nulo de magnitud el cual es significativo su intercepto, lo que quiere decir que en promedio la magnitud de los sismos es de 2,29 se procede luego al cálculo

de su variograma, como se observa en la figura 6, la magnitud tiene una distribución espacial. En este caso el modelo de variograma que mejor se ajusta es el exponencial.

Cuadro N°1. Coeficiente modelo nulo magnitud

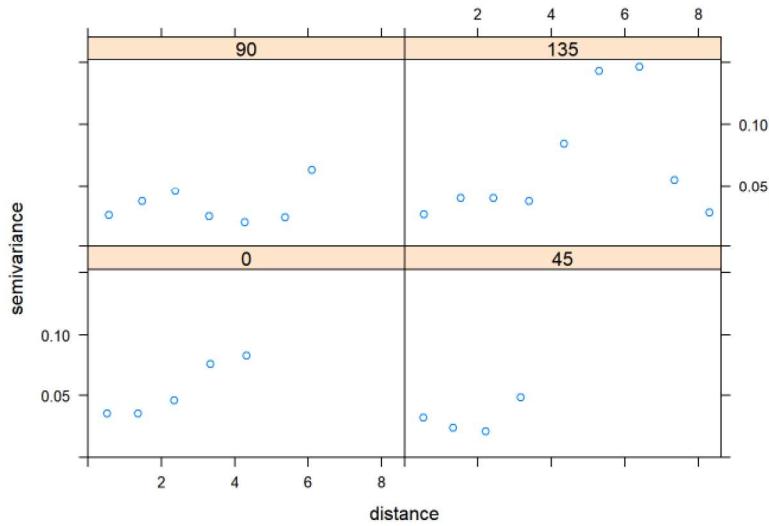
Coeficiente	Estimado	Pr(> t)
Intercepto	2,29	0,00

Figura 6. Variogramas modelo nulo magnitud. Costa Rica, 2010-2019



Los variogramas del modelo nulo de magnitud nos presenta una estabilidad al inicio, el cual se ve afectado luego por una alza, la cual luego vuelve a estabilizarse.

Figura 7. Variogramas modelo nulo magnitud. Costa Rica, 2010-2019



Cuadro N°2. Resultado variograma modelo nulo magnitud

Modelo	psill	range
Nug	0,0225	0,0000
Exp	0,0220	1,2786

Modelo Nulo Profundidad

El siguiente modelo, es el modelo nulo de profundidad, en el intercepto es significativo, lo que quiere decir que en promedio la profundidad de los sismos del 2010 al 2019 es de 2,76 km, la profundidad como lo vemos en sus variograma tiene una distribución espacial, para este modelo el mejor variograma también es exponencial.

Cuadro N°3. Coeficiente modelo nulo profundidad

Coeficiente	Estimado	Pr($> t $)
Intercepto	2,76	0,00

El variograma en este caso lleva una tendencia a crecer, como lo vemos en la figura 8.

Figura 8. Variogramas modelo nulo profundidad. Costa Rica, 2010-2019

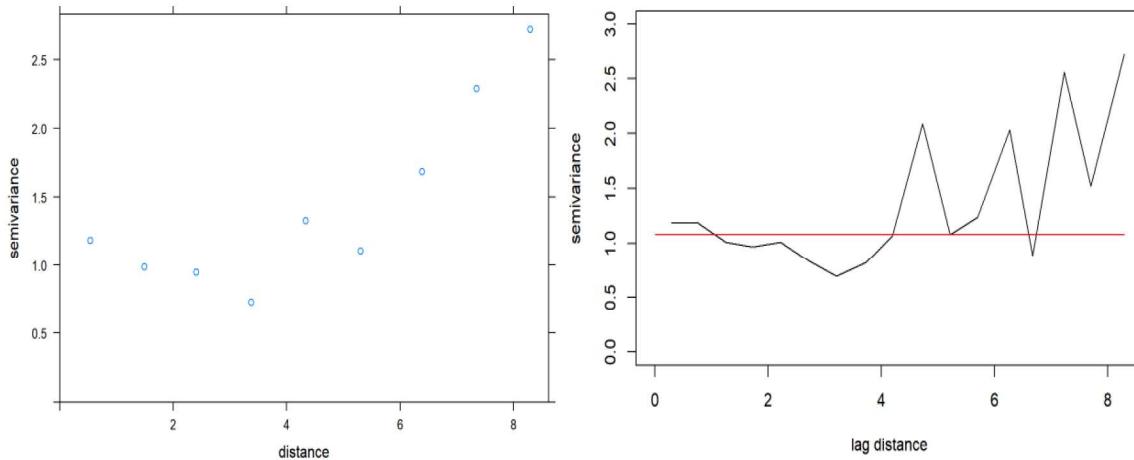
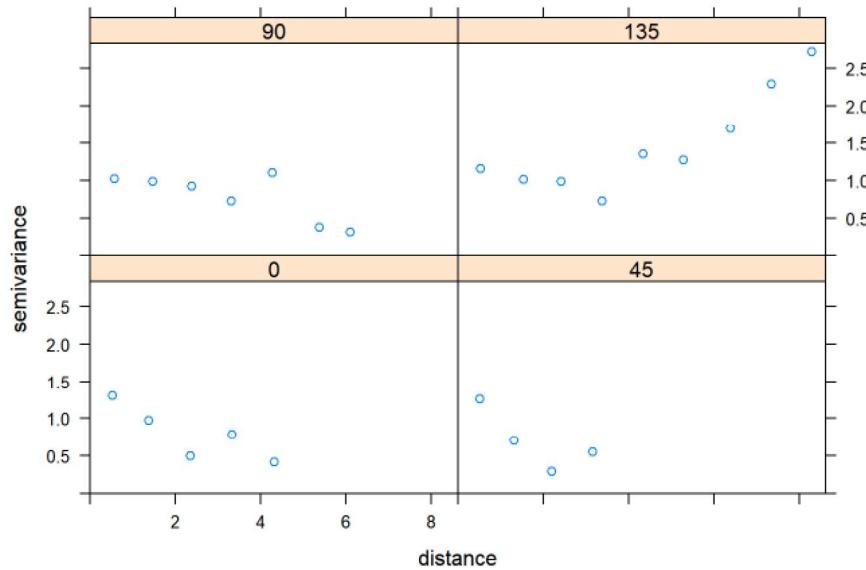


Figura 9. Variogramas modelo nulo magnitud. Costa Rica, 2010-2019



Cuadro N°4. Resultado variograma modelo nulo profundidad

Modelo	psill	range
Nug	1,2348	0,0000
Exp	3,6093	40,5322

Modelo Nulo Aceleración

Para el modelo nulo de aceleración, su intercepto también es significativo por lo cual podemos decir que el promedio de aceleración de los sismos es de 1,47 cm/s², en el caso de los variogramas se observa una relación más lineal creciente, para este caso el mejor variograma ajustado es el esférico.

Cuadro N°5. Coeficiente modelo nulo aceleración

Coeficiente	Estimado	Pr(> t)
Intercepto	1,47	0,00

Figura 10. Variogramas modelo nulo aceleración. Costa Rica, 2010-2019

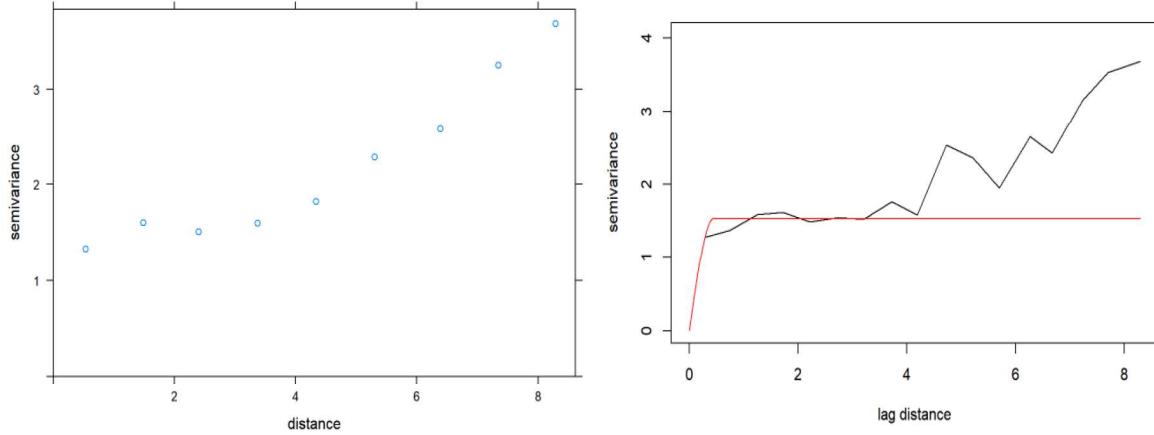
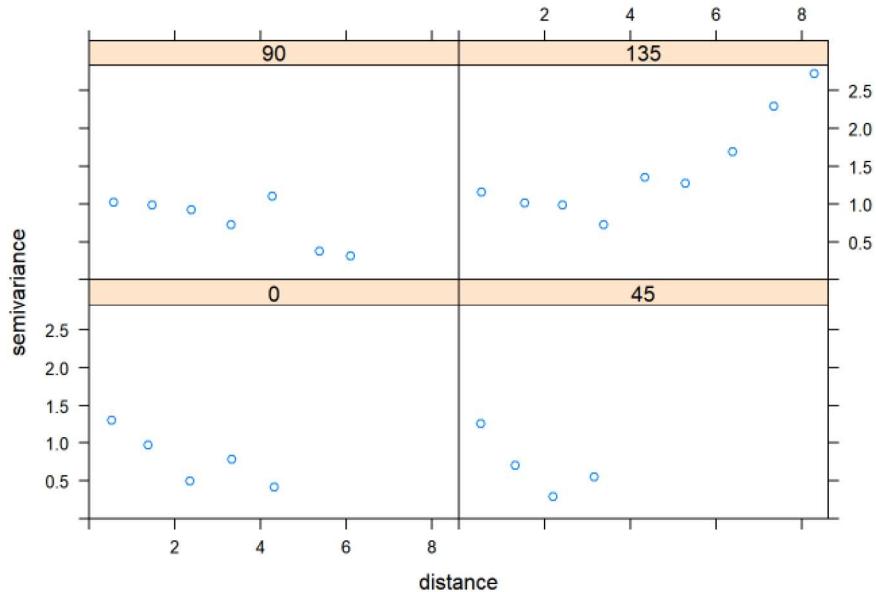


Figura 11. Variogramas modelo nulo magnitud. Costa Rica, 2010-2019



Cuadro N°6. Resultado variograma modelo nulo aceleración

Modelo	psill	range
Nug	0,9852	0,0000
Exp	0,6070	1,3438

Modelo Magnitud - Aceleración

Por último, se plantea un modelo magnitud aceleración, en este caso por cada aumento de una unidad de la aceleración, las magnitudes de los sismos varían en promedio 1,18, el mejor

variograma en este caso es el gaussiano, y se puede observar su forma creciente, pero que a lo último empieza a decrecer.

Cuadro N°7. Coeficientes modelo magnitud-aceleración

Coeficiente	Estimado	Pr(> t)
Intercepto	1,18	0,005
log(Acelaracion_cms2)	0,07	0,002

En la Figura 12.a, se muestra el análisis de residuos del modelo lineal, no se presentan indicios de heterocedasticidad y falta de normalidad por lo que los supuestos no se violentan.

Figura 12.a .Análisis de residuos del modelo magnitud y aceleración. Costa Rica, 2010-2019

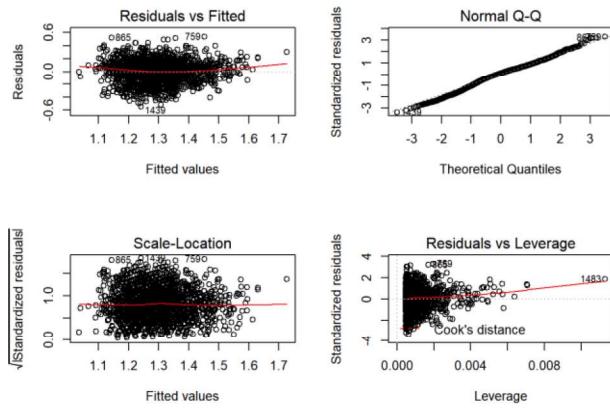
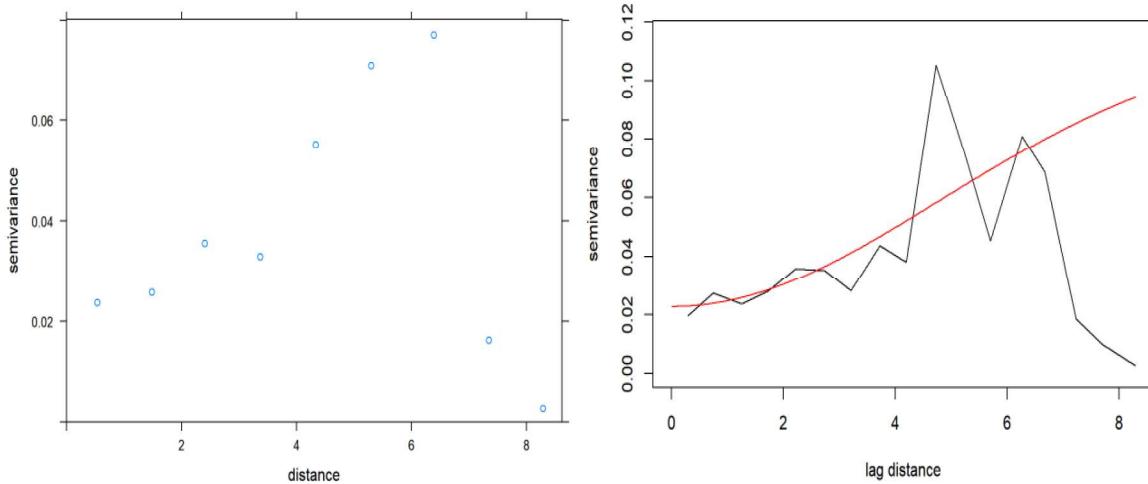
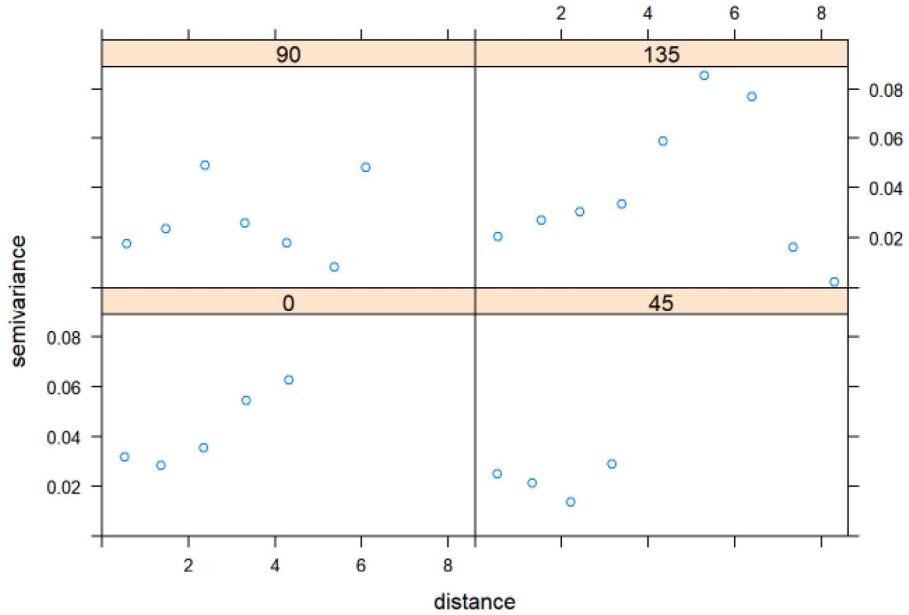


Figura 12. Variogramas modelo magnitud aceleración. Costa Rica, 2010-2019



Por lo que visualmente se refleja que existe una distribución y estructura de modelo lineal de la magnitud explicada por la aceleración del sismo.

Figura 13. Variogramas modelo magnitud y aceleración. Costa Rica, 2010-2019

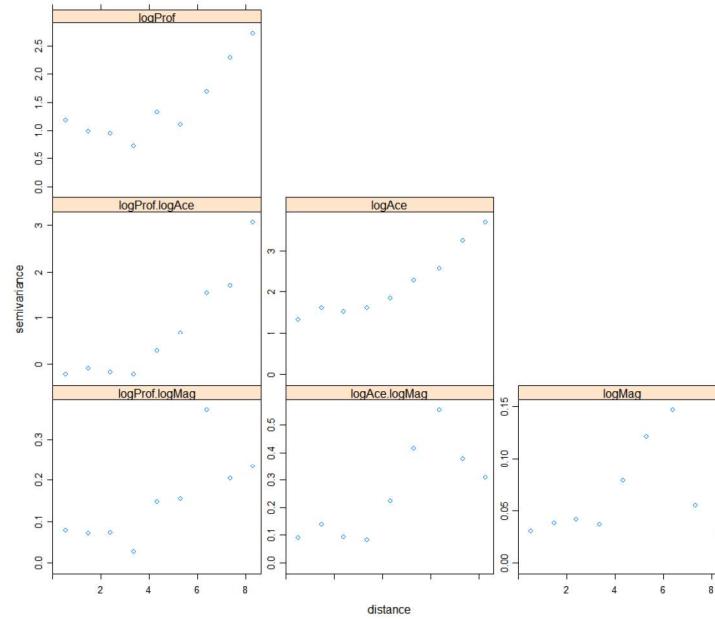


Cuadro N°8. Resultado variograma modelo magnitud-aceleración

Modelo	psill	range
Nug	0,0238	0,0000
Exp	29,6651	126,1179

En este caso se tiene más de una variable espacial analizada, por lo que se pueden utilizar semivariogramas cruzados. El semivariograma cruzado muestra las correlaciones entre la profundidad, magnitud y aceleración. En la Figura 14, se muestran los variogramas espaciales entre las variables.

Figura 14. Variogramas variables correlacionadas magnitud, profundidad y aceleración. Costa Rica, 2010-2019



Además, para esto se estima un modelo lineal de correacionalización-CoKriging entre las variables, en el Cuadro 9 se muestran los estadísticos descriptivos entre las variables. Se muestran altas variancias en la variable aceleración de igual forma con las covarianzas profundidad y aceleración.

Cuadro N°9. Estadísticos descriptivos de las variables del modelo lineal de correacionalización-CoKriging. Costa Rica, 2010-2019

Variable	Estadístico			
	Mínimo	Mediana	Media	Máximo
logProf.pred	3.278	3.278	3.280	3.410
logProf.var	17.12	21.93	21.83	21.93
logAce.pred	3.243	3.249	3.252	3.576
logAce.var	131.0	170.2	169.4	170.2
logMag.pred	1.689	1.699	1.699	1.699
logMag.var	7.142	9.290	9.248	9.290
cov.logProf.logAce	43.89	57.20	56.94	57.20
cov.logProf.logMag	3.109	4.021	4.003	4.021
cov.logAce.logMag	15.51	20.16	20.07	20.16

CONCLUSIONES

Según los análisis presentados se muestran que las variables características a los sismos como magnitud, profundidad y aceleración, presentan una distribución espacial en el territorio y además utilizando los métodos geoestadísticos se muestra que las variables con su comportamiento y tendencia en el espacio presenta una estructura de modelamiento lineal espacial.

Además, considerando el modelo lineal de correacionalización CoKriging entre las variables, la aceleración presenta valores altos en la variancia, al igual que la covariancia entre la aceleración y la profundidad. Por la tendencia de los variogramas de las correlaciones se muestran que entre sí tienen una distribución y estructura lineal espacial.

BIBLIOGRAFÍA

González. J, (2018). Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmica de refracción somera en la isla de barrera de la Laguna de Unare, Estado Anzoátegui. Universidad Central de Venezuela.

Huertas. S, (2018). Análisis Estadístico Clásico y Robusto de Datos Espaciales. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España. Recuperado de: http://espacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:masterMatavanzShuertas/Huertas_Amoros_Salvador_TFM.pdf

Lorenzo. J, (2017). Volcanes, terremotos y matemáticas. Universidad de La Laguna. España. Recuperado de: <https://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo2/13/jmlorenzo.pdf>

Red Sismologica Nacional (2019). Archivo Catalogo de sismos de Costa Rica. Recuperado de: https://rsn.ucr.ac.cr/images/Sismologia/RSN_Catalogue.txt

Sánchez. L, Girado, O. y Urango, G. (2017). Estimación global de la macroseismicidad en los municipios del Departamento de Antioquia, Colombia. Recuperado de: http://paritario.utalca.cl/docs/MESA_B_PONENCIAS/B_12_Estimacion_Global_Macrosismicidad_SANCHEZ_GIRADO.URANGO.pdf

Vallejos. S, Esquivel, L. y Hidalgo, M. (2012). Histórico de Desastres en Costa Rica (Febrero 1723 - Setiembre 2012) -- San José, C.R. : CNE, 2012. Recuperado de: <https://www.bvs.sa.cr/ambiente/4923.pdf>