Guerrón Burbano Darío Javier

Universidad Central del Ecuador

2022





Contenido

- Introducción.
- Objetivo.
- Métodos y Resultados.
- Conclusiones.
- Referencias Bibliográficas.

- 4 Métodos y Resultados

Introducción

Este trabajo presenta un estudio de Cadenas de Markov aplicadas a la probabilidad de ocurrencia de un sismo.

Para ello, se utilizó un conjunto de datos históricos para seis localidades en América del Sur, los cuales fueron divididos en seis bandas de magnitud y fue posible mostrar que las mayores probabilidades están en la previsión de que un próximo sismo tenga una magnitud entre 3 a 3,9.

- Introducción
- 2 Objetivo
- 4 Métodos y Resultados

Objetivo

El objetivo de este trabajo es calcular, utilizando Cadenas de Markov, la probabilidad de ocurrencia de un nuevo sismo en América del Sur, enfocándose en localidades como Chile, Argentina, Colombia, la frontera entre Chile y Argentina, Perú y Ecuador.

- Introducción
- 3 Modelo
- 4 Métodos y Resultados



Un proceso estocástico es un proceso de cadena de Markov si la probabilidad de ocurrencia de un estado futuro depende sólo del estado presente, es decir, si es independiente de los eventos pasados.

Para los propósitos del presente trabajo se tiene los siguientes estados: "3 a 3,9", "4 a 4,9", "5 a 5,9", "6 a 6,9", "7 a 7,9" y "8 a 8,9", los cuales representan la magnitud de un sismo en la escala de Ritcher.

8 / 59

La probabilidad de transición de un evento se indica en las siguientes ecuaciones:

$$p_{ij} = P\{X_{t+1} = j | X_t = i\}$$
 (1)

$$p_{ij}^n = P\{X_{t+n} = j | X_t = i\}$$
 (2)

 X_t : variable en el tiempo t.

 p_{ij}^n : probabilidad de que un sismo pase del estado i al estado j en n pasos en el tiempo t.

Una manera de presentar estas transiciones es con el uso de la matriz de transición.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & p_{i3} & \cdots & p_{ij} \end{bmatrix}$$
(3)

La probabilidad de estado estable y su propiedad π_j para una cadena de Markov ergódica (es posible ir de cualquier estado a otro cualquiera en n pasos de tiempo) se indica respectivamente en la siguientes ecuaciones.

$$\pi_j = \sum_{i=0}^{M} \pi_i p_{ij}, para \ j = 0, 1, ..., M.$$
 (4)

$$\sum_{j=0}^{M} \pi_j = 1 \tag{5}$$

Con π_j el vector de condiciones iniciales.

La ecuación 6, permite analizar el tiempo de repetición esperado, representado por μ_u para cuando j=i, que es el número esperado de transiciones hasta que el proceso retorne al estado inicial i.

$$\mu_u = \frac{1}{\pi_i}, para \ i = 0, 1, ..., M.$$
 (6)

- Introducción
- Objetivo
- 3 Modelo
- 4 Métodos y Resultados

Flaboración de la matriz de transición

Probabilidad de estado estable y tiempo esperado de recurrencia

- 6 Conclusiones
- 6 Referencias Bibliográficas



Métodos y Resultados

Para alcanzar el objetivo propuesto para este estudio, la metodología elaborada fue dividida en tres etapas:

- Recopilación de los datos.
- Elaboración de la matriz de transición.
 - Proceso de Cadena de Markov.
 - Trayectoria más probable.
- Probabilidad de estado estable y tiempo esperado de recurrencia.

- 1 Introducción
- Objetivo
- 3 Modelo
- Métodos y Resultados

Elaboración de la matriz de transición Probabilidad de estado estable y tiempo esperado de recurrencia

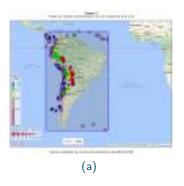
- 6 Conclusiones
- 6 Referencias Bibliográficas

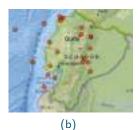


Se utilizaron datos históricos de sismos que ocurrieron en América del Sur, obtenidos en la dirección electrónica de las Instituciones de Investigación Incorporadas para Sismología (Incorporated Research Institutions for Seismology - IRIS) y del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)

Los eventos en las localidades de Chile, Argentina, Colombia, Perú, y la frontera entre Chile y Argentina son referentes al 1 de enero del 2000 al 7 de abril del 2018, y para la localidad de Ecuador son del 1 de enero del 2020 al 26 de marzo del 2022.

En la dirección electrónica del IRIS, es posible observar en el mapa las ocurrencias de los sismos, como muestra la Figura (a) y en la dirección electrónica del Instituto Geofísico de la EPN es posible observar la ocurrencia de los sismos para Ecuador. Figura (b)





Spales S

-	Parameters.
HH	"Not written, or better, bester on annual contract foreignes.
	feeds all to object proof or took reprise to to population of the contract of
9998	Natival Assistantial cel lacroma della si casa dell'assistantia di disposizione della significazione del significazione del significazione del significazione della significazione della consistenza del significazione della consistenza della consis
0000	Series per la reportario de incurrence per el rese plenda, especia desarrador. Apparia contra la applica primaria y cultura haquanta, sea aprime segritor acessa en applica- gantes acesta, acestações desar, a plenta haquanta acesta, respectador de alexanda, puesto desarrador acestador de acestador acestador de acestador de acestador de acestador consecuente de aprime desarrador de acestador de acestador de acestador de acestador de consecuente de aprime desarrador de acestador de ac
1414	Provide the finite. Proving actuality, Mayoral conduct accessing contents of the finite of the finit
****	Define these or nativatives represented by provided, states considerable or without considerable or without considerable and without the providerable or experience of providerable Defined interests and without continuous variances, and providerable and providerable or the providerable of the providerable
4414	made participates o competitorio de indicato, decent sel subsectivat a participate del atticipate del propositato initiati posser del sente appropria describe del propositato dissocia (1960) di competitorio del atticipato della competito del
****	These sub-strong, of algorithm (algorithm), pro-processor, part Tanana sub-sections of anything a sub-strong and associated and a sub-strong and associated and a sub-section
-	One distributed that include property of the control of the con- property product of control of the place describe and the control of the control of the description of the control of the

forms required all freedoming delivering to \$10.000



Como se describe el en Cuadro 1, es a partir de la magnitud 3 en la escala de Ritcher que los sismos son perceptibles a las personas, por lo que se seleccionaron solamente los sismos que tuvieron una magnitud mayor o igual a 3.

Así, en las cinco localidades se produjeron aproximadamente 78.764 sismos de magnitud mayor o igual a 3 grados, mientras que en Ecuador se produjeron 611 sismos dentro del rango de magnitud en la escala de Richter.

El Cuadro 2 presenta la cantidad de sismos correspondientes a cada intervalo de magnitud en las cinco localidades y el Cuadro 2.a presenta la cantidad de sismos correspondientes a cada intervalo de magnitud en Ecuador.

Contract to comments personal resource on required			
(otoronia de reagantes)	contact to deco	*	
2 + 2,8	(0.0)	96,409	
****	1110	00000	
teta	3.694	1,114	
1995	294	4,34%	
rena .	30	0,000	
1912		6.00%	
No. of		100	
Select Co.	79.764	seem	

		e magnitus.
Manager for departs	Contidute into	- 5
1939	10	33%
(117)	12	16389
569		1295
Sult	- 1	10%
NB	- 1	109%
1/01	1	1925
2426	1	30%
Ted	41	1976

(c) Cuadro 2

(d) Cuadro 2.a

También fue cotejada la información de que ocurrirá el sismo dependiendo de la profundidad, conforme registrado el en Cuadro 3 para las cinco localidades y en el Cuadro 3.a para Ecuador.

materials (but)	tendidat in datus	-
1444		10,111
****	71864	14-191
Seattle	19611	34.7H
1011000	11,000	in in
manner.		6477
MI + 600	200	2.000

(e)	Cuadro	3
. ,		



(f) Cuadro 3.a

El Cuadro 4 muestra la cantidad de sismos entre el intervalo de magnitud y el intervalo de profundidad para las cinco localidades y el Cuadro 4.a para Ecuador.



(g) Cuadro 4



(h) Cuadro 4.a

- Introducción
- Objetivo
- Modelo
- Métodos y Resultados

Elaboración de la matriz de transición

Proceso de Cadena de Markov Travectoria más probable

Probabilidad de estado estable y tiempo esperado de recurrencia

6 Conclusiones





Para calcular las matrices de transición, fue necesario definir intervalos para las magnitudes, como se muestra en el Cuadro 5.

Garettanin	Jelaman da magnitud		
7	2+3.0		
	14.60		
	1+11		
4	11.33		
25	73.58		
	1450		

(i) Cuadro 5

Con el intervalo de variaciones, fue posible analizar las frecuencias de sismos en cada localidad con variaciones en cada uno de estos intervalos.



	All Lypnic	11.13	4443	HALF	****	THER.
	Value.	TIME	1333	47		1
	4 6 6 5		460	81.	1.1	4
No. 4	2112	529	44	11.	4	7
	6162	74	18		1	1
	Table				- 6	1

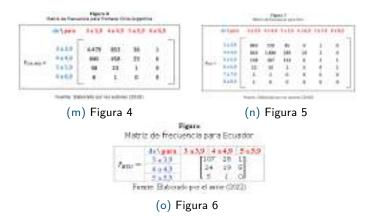
(j) Figura 1

(k) Figura 2

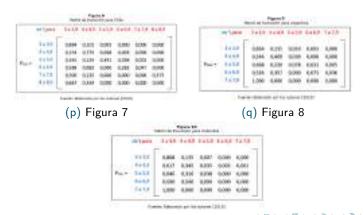


Transa Eleberario per los miseres (2000)

(I) Figura 3



Utilizando esta información, fue posible calcular la matriz con las probabilidades de transición de estados. Las matrices se presentan en las siguientes figuras.





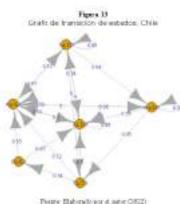
(s) Figura 10

(t) Figura 11



(u) Figura 12

Para la localidad de Chile.

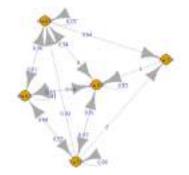


estados son accesibles.

- Todos
 los estados son comunicantes por tanto la cadena es irreducible.
- Todos los estados son recurrentes, ya que la probabilidad de eventual visita $f_{ij}=1$.
- No hay estados absorbentes (El estado i es absorbente si y sólo si ningún otro estado de la cadena es accesible desde él, es decir, si P_{ij} = 1) ya que todos los

Para la localidad de Argentina.

Rigura 14
Grafo de transición de estados, Argentina.



Fixente: Elaborado por el autor (2022)

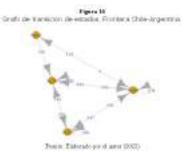
- Todos
 los estados son comunicantes por
 tanto la cadena es irreducible.
- Todos
 los estados son recurrentes,
 ya que la probabilidad
 de eventual visita f_{ii} = 1.
- No hay estados absorbentes ya que todos los estados son accesibles.

Para la localidad de Colombia.

Fuerts: Elaborado por el antor (2002)

- Todos
 los estados son comunicantes por tanto la cadena es irreducible.
- Todos los estados son recurrentes, ya que la probabilidad de eventual visita f_{ii} = 1.
- No hay estados absorbentes ya que todos los estados son accesibles.

Para la localidad de la Frontera entre Chile y Argentina.



- Todos
 los estados son comunicantes por tanto la cadena es irreducible.
- Todos
 los estados son recurrentes,
 ya que la probabilidad
 de eventual visita f_{ij} = 1.
- No hay estados absorbentes ya que todos los estados son accesibles.

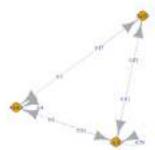
Para la localidad de Perú.



- Todos
 los estados son comunicantes por
 tanto la cadena es irreducible.
- Todos los estados son recurrentes, ya que la probabilidad de eventual visita $f_{ij} = 1$.
- No hay estados absorbentes ya que todos los estados son accesibles.

Para la localidad de Ecuador.

Figera 18 Grafo de transición de estados, Ecuador.

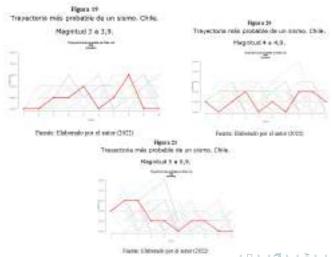


Friente: Elaborado por el sistor (2022)

- Todos
 los estados son comunicantes por
 tanto la cadena es irreducible.
- Todos
 los estados son recurrentes,
 ya que la probabilidad
 de eventual visita f_{ii} = 1.
- No hay estados absorbentes ya que todos los estados son accesibles.

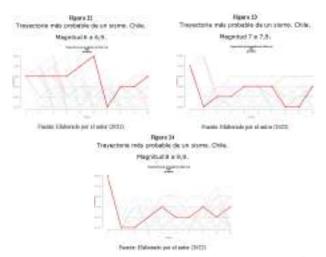
Trayectoria más probable

Para la localidad de Chile.



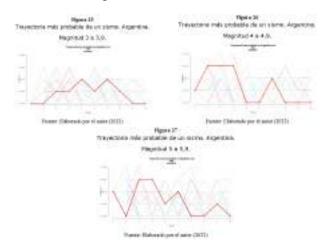
Trayectoria más probable

Para la localidad de Chile.



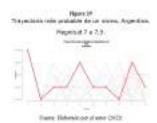
Trayectoria más probable

Para la localidad de Argentina.

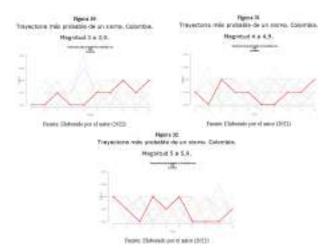


Para la localidad de Argentina.

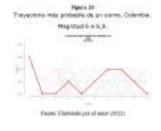


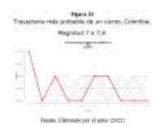


Para la localidad de Colombia.



Para la localidad de Colombia.





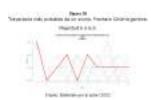
Para la localidad de Frontera Chile-Argentina.



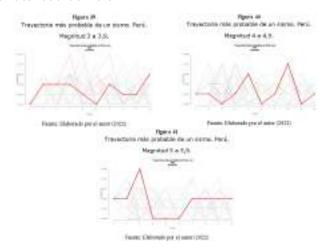


Para la localidad de Frontera Chile-Argentina.

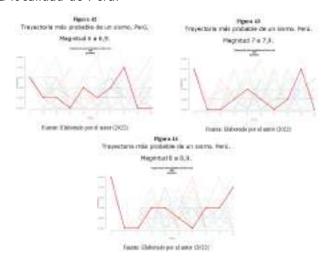




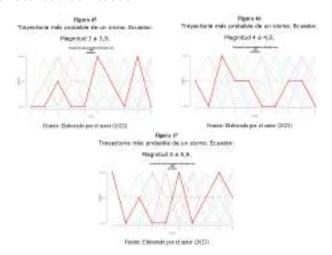
Para la localidad de Perú.



Para la localidad de Perú.



Para la localidad de Ecuador.



- Introducción
- Objetivo
- 3 Modelo
- 4 Métodos y Resultados

Datos

Elaboración de la matriz de transición

Probabilidad de estado estable y tiempo esperado de recurrencia

- 6 Conclusiones
- 6 Referencias Bibliográficas



En esta etapa se realizaron los cálculos referentes al estado estable, conforme presentado en las ecuaciones 4 y 5. Las ecuaciones 7 a 15 presentan el estado estable referente a la probabilidad de transición de los datos de Chile.

$$(\pi_0\pi_1\pi_2\pi_3\pi_4\pi_5)$$

$$= (\pi_0\pi_1\pi_2\pi_3\pi_4\pi_5) \begin{bmatrix} 0.894 & 0.101 & 0.005 & 0 & 0 & 0\\ 0.154 & 0.775 & 0.068 & 0.003 & 0 & 0\\ 0.345 & 0.124 & 0.491 & 0.038 & 0.002 & 0\\ 0.588 & 0.082 & 0 & 0.282 & 0.048 & 0\\ 0.500 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0.375\\ 0.667 & 0.333 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(\pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5) = 1 \tag{8}$$

Resultando el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\pi_0 = 0.894\pi_0 + 0.154\pi_1 + 0.345\pi_2 + 0.588\pi_3 + 0.500\pi_4 + 0.667\pi_5$$

$$\pi_1 = 0.101\pi_0 + 0.775\pi_1 + 0.124\pi_2 + 0.082\pi_3 + 0.125\pi_4 + 0.333\pi_5$$
(10)

$$\pi_2 = 0.005\pi_0 + 0.068\pi_1 + 0.491\pi_2 \tag{11}$$

$$\pi_3 = 0.003\pi_1 + 0.038\pi_2 + 0.282\pi_3 \tag{12}$$

$$\pi_4 = 0.002\pi_2 + 0.047\pi_3 \tag{13}$$

$$\pi_5 = 0.375\pi_4 \tag{14}$$

$$1 = \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 \tag{15}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes resultados.

$$\pi_0 = 0.6346$$
 $\pi_3 = 0.0038$
 $\pi_1 = 0.3131$ $\pi_4 = 0.0003$
 $\pi_2 = 0.0481$ $\pi_5 = 0.0001$

Los mismos cálculos se realizaron para los datos de Argentina, Colombia, frontera entre Chile y Argentina, Perú y Ecuador.

Estos valores representan la probabilidad de encontrarse en determinados estados, en el Cuadro 6 se indican todas las probabilidades de estado estable de cada localidad de estudio.

Coutre T. Protest Ridget de les entrates

	Pretubilidad de estado					
Intervals do reaspeited	Chile	Argentas	Columbia	Frosters Chi-Arg	Fee	Econdo
3 + 3,5	43.484	26,30%	62,43%	79,25%	33,36%	71,58%
4+45	21,27%	21,83%	10,13%	9,73%	38,379	23,28%
5+55	4.87%	1,72%	1,19%	1,54%	.9.1.2%	3.1.5%
6 4 6 5	1,38%	1,36%	0,09%	1,18%	0.53%	- Ph
7475	1,03%	6,32%	0,02%	08	0.12%	294
8 + 8.5	8,07%	674	- 085	004	8,069	894

(v) Cuadro 6

Se puede observar que hay una mayor probabilidad de estado estable del intervalo de 3 a 3,9 de magnitud para todas las localidades estudiadas, con la excepción de Perú, que la mayor probabilidad es del intervalo de 4 a 4,9 de magnitud.

Además, con la ecuación 6 es posible analizar el tiempo de repetición esperado para cada probabilidad de estado estable, conforme el Cuadro 7.

Tiempo de Repetición



(w) Cuadro 7

Así, es posible visualizar que el tiempo de recurrencia de un sismo en Ecuador con magnitud entre 3 a 3,9, es de 1,4 eventos, es decir, se espera que después de 1,4 sismos independientemente de las magnitudes ocurra otro de magnitud entre 3 y 3,9.

Probabilidad de un sismo

Se estudió la probabilidad de que se produzca un sismo, dependiendo de la magnitud de los dos últimos eventos. Para ello, se realizó una nueva clasificación de las magnitudes, conforme Cuadro 8.



m-r	gly 6:	186-6
140-4	44-6	-0-1
NO.	RI b	900
10.0	84.0	10.0
10.0	10.0	- 0.0
prox.	10.0	- 40
-	mi	580
100	961	-0-1
m-1	400	9.4

(x) Cuadro 8

(y) Cuadro 9

Obteniendo 27 posibles combinaciones de eventos observadas en el Cuadro 9.

Probabilidad de un sismo

	47,074	2014	irm
	19,000	20179	19
	100%	riv.	110
*	30,000	1449	94
	30.074	3.49	1.00
-	197.00	0.00	711
	1079	-	(4)
at.	blero.	65	194

	Anatomic 5 being		
	- A -		- 6
M -	10.179	1416	9000
NO .	46,07%	6/9/9	1381
AL.	solve		- 175
in .	min	Line	770
-	40,000	0,674	- 75
	00%	im.	200
Oh.	286	-	- 64

(z) Cuadro 10

() Cuadro 11

Para Chile, después de dos sismos de magnitud entre 3 y 4,9, hay una probabilidad de 97,37% de que el tercero también esté en esta franja. Para Argentina, después de una combinación AC, hay una probabilidad del 100% de ocurrir un sismo de magnitud entre 3 y 4,9.

Probabilidad de un sismo

Appeles E3 Application 3 metrics perindrament			3
			- 4
Ah	96,70%	(176	4,04%
All .	95-25%	57%	m
40	1979.	Ph.	610.
SA'	95,59%	1.00%	- 7%
-	1895	1%	7%
CS:	18%	196	- 100

	- 4	-	
	1.5		
000	14.00%	6.676	in
46	96,35%	1,07%	176
04	100%	79.	m
-	1900	10	- 10

() Cuadro 12

() Cuadro 13

Para Colombia, dentro del período analizado no se registro un sismo de magnitud entre 5 a 6,9 seguido de otro de 7 a 8,9, por lo que la combinación BC no está en el Cuadro 13, así como CB y CC. Para la frontera entre Chile y Argentina, después de un evento de magnitud entre 3 y 4,9, seguido de otro de 5 a 6,9, hay un 98,53% de probabilidad de que el tercero sea de magnitud entre 3 y 4,9.

Guerrón Burbano Darío Javier

Universidad Central del Ecuador

Introducción Objetivo Modelo **Métodos y Resultados** Conclusiones Referencias Bibliogr

Probabilidad de un sismo

States III - Contractor (Sec.)				
			4.	
M	11,600	0.786	100	
40	4.00	16,600	6,304	
40	Lien	616	-	
98.	11.00	0,675	(L)M	
-	845	19,56%	100	
*	1965	44	-	
3	1900	44	266	

Aridit	as de 3 eve	dre 16 Intos para 6	coado
	A		e
AA	28,2976	1,04%	0%
All	28,77%	1,27%	10%
BA	109%	10%	(2%)
100	109%	0%	- 0%

() Cuadro 14

() Cuadro 15

Para Perú, hay mayor probabilidad de que el tercer sismo sea de magnitud 3 a 4,9 para todas las situaciones. Para Ecuador, después de dos sismos de magnitud entre 3 y 4,9, hay una probabilidad de 98,96% de que el tercero esté en esta franja, dentro del período de estudio no se registro un sismo entre 5 a 6,9 o de 7 a 8,9, por lo que la combinación BC, CB y CC no están en el Cuadro 15.

- Introducción

- 4 Métodos y Resultados
- **5** Conclusiones



Conclusiones

En este estudio fue posible y viable la utilización de cadenas de Markov para predecir la probabilidad de un sismo dependiendo de los dos sismos anteriores en las localidades de Chile, Argentina, Colombia, Frontera entre Chile-Argentina, Perú y Ecuador, utilizando una base histórica de datos de casi dos décadas.

56 / 59

- Introducción

- 4 Métodos y Resultados
- 6 Referencias Bibliográficas



Referencias Bibliográficas

- Boeira, R. Corso, L. (2019). Análisis de eventos de terremotos en América del Sur con una utilización de la Cadena de Markov. Analysis of earthquake events in South America with a use of Markov Chain. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/ 330729040 Analisis_de_eventos_de_terremotos_en_ America del Sur con una utilizacion de la Cadena de Markov Analysis of earthquake events in South America with a use of Markov Chain
- IRIS (2022). IRIS Earthquake Browser. Disponible en http: //ds.iris.edu/ieb/index.html?format=text&nodata= 404&starttime=2021-09-26&endtime=2022-09-21& minmag=0&maxmag=10&mindepth=0&maxdepth=900& orderby=time-desc&src=&limit=800&maxlat=7.429& minlat=-55.140&maxlon=-59.540&minlon=-82.567&sbl= 1kc2]] 0r=0yp2g0kovid=115/3260kzm=3kmt=tor

Referencias Bibliográficas

• INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.(2022). Informes de los últimos sismos. Disponible en https://www.igepn.edu.ec/ultimos-sismos