



**Comparación de resultados de la estimación estadística de sismos entre los métodos del  
Algoritmo M8 y Lógica Difusa, en el Ecuador Continental**

Tamayo Tinajero, José Luis

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio  
Ambiente

PhD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

27 de enero del 2021

## Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS\_FINAL\_TAMAYO\_urk.docx (D91683077)  
 Submitted: 1/11/2021 2:40:00 PM  
 Submitted By: ovpadilla@espe.edu.ec  
 Significance: 2 %

### Sources included in the report:

TESIS\_GOMEZ.pdf (D60088807)  
 ESCRITO\_ASIMBAYA\_SUAREZ.docx (D78523366)  
 S Baque Iza.docx (D77821798)  
 tesis\_fgutierrez.pdf (D47754735)  
[https://www.researchgate.net/publication/320404080\\_COMPLETITUD\\_DEL\\_CATALOGO\\_DE\\_LA\\_RED\\_SISMOLOGICA\\_NACIONAL\\_DE\\_COSTA\\_RICA\\_DURANTE\\_1975-2014\\_COMPLETENESS\\_OF\\_THE\\_COSTA\\_RICA\\_NATIONAL\\_SEISMOLOGICAL\\_NETWORK\\_CATALOG\\_DURING](https://www.researchgate.net/publication/320404080_COMPLETITUD_DEL_CATALOGO_DE_LA_RED_SISMOLOGICA_NACIONAL_DE_COSTA_RICA_DURANTE_1975-2014_COMPLETENESS_OF_THE_COSTA_RICA_NATIONAL_SEISMOLOGICAL_NETWORK_CATALOG_DURING)  
<https://www.emol.com/noticias/nacional/2012/05/17/540993/la-vez-en-que-los-cientificos-lograron-predecir-un-terremoto.html>Reasenberg,  
<https://docplayer.es/72142040-Universidad-nacional-de-san-agustin-facultad-de-geologia-geofisica-y-minas-escuela-profesional-de-ingenieria-geofisica.html>  
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/3185/ramos2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>  
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/1309/tesisCondori.pdf?sequence=1&isAllowed=y>  
[http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007\\_Geofisica.pdf](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_Geofisica.pdf)  
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11742/1/T-ESPE-053156.pdf>  
<https://docplayer.es/84188108-Tesis-doctoral-universidad-politecnica-de-madrid-escuela-tecnica-superior-en-ingenieria-topografica-geodesia-y-cartografica.html>  
[http://oa.upm.es/34808/1/PFC\\_PABLO\\_BIENZOBAS\\_GARCIA.pdf](http://oa.upm.es/34808/1/PFC_PABLO_BIENZOBAS_GARCIA.pdf)

### Instances where selected sources appear:

27

Firma:

Oswaldo  
 Padilla Almeida  
 Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla Almeida  
 Nombre de reconocimiento (DN): cn=Oswaldo  
 Padilla Almeida, o=Universidad de las Fuerzas  
 Armadas ESPE, ou=Departamento de Ciencias de la  
 Tierra y de la Construcción,  
 email=ovpadilla@espe.edu.ec, c=EC  
 Fecha: 2021.01.20 16:40:24 -0500

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

Certificación  
**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “Comparación de resultados de la estimación estadística de sismos entre los métodos del Algoritmo M8 y Lógica Difusa, en el Ecuador Continental” fue realizado por el señor **Tamayo Tinajero, José Luis** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de enero del 2021

Firma:

Oswaldo  
 Padilla  
 Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla Almeida  
 Nombre de reconocimiento (DN):  
 cn=Oswaldo Padilla Almeida,  
 o=Universidad de las Fuerzas Armadas  
 ESPE, ou=Departamento de Ciencias de la  
 Tierra y de la Construcción,  
 email=ovpadilla@espe.edu.ec, c=EC  
 Fecha: 2021.01.20 10:46:02 -05'00'

**Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio**

C. C 1709776650



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Tamayo Tinajero, José Luis**, con cédula de ciudadanía n°1723340210, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Comparación de resultados de la estimación estadística de sismos entre los métodos del Algoritmo M8 y Lógica Difusa, en el Ecuador Continental** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 11 de enero del 2021**

Firma

**Tamayo Tinajero, José Luis**

C.C.: 1723340210



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Tamayo Tinajero, José Luis**, con cédula de ciudadanía n° 1723340210, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Comparación de resultados de la estimación estadística de sismos entre los métodos del Algoritmo M8 y Lógica Difusa, en el Ecuador Continental en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 11 de enero del 2021**

Firma

**Tamayo Tinajero, José Luis**

C.C.: 1723340210

## Dedicatoria

*Con profundo cariño y aprecio, dedico este trabajo a mis padres, Jorge Tamayo y Seida Tinajero, sin ellos nada de esto sería posible y yo no sería la persona que soy ahora.*

*A mis hermanos, quienes, a través de su vida, sus actos y consejos me han ayudado infinitamente a seguir adelante y espero poder seguir aprendiendo con y junto a ellos.*

*A mis amigos y familiares con los que he compartido muchísimos momentos a lo largo de toda mi vida y que, sea con su presencia física o espiritual, me han brindado, me brindan y espero me sigan brindando su apoyo.*

*Finalmente, dedico esta investigación a todas las personas que crean que las "ideas locas" solo pueden quedar en eso, ideas, y que lo que van a leer a continuación sea una muestra que los imposibles solo están en cada uno de nosotros.*

## Agradecimiento

Doy gracias en primer lugar a Dios (o el ente creador de la preferencia del lector) quien, con sus bendiciones y el don de la vida, me ha permitido cumplir esta meta.

A mi profesor, Oswaldo Padilla (más conocido como el Inge Padi), quien se convirtió en una guía moral y un gran amigo más, quien, a través de sus conocimientos y apoyo, me hizo apreciar el espíritu de investigar y, sobre todo, el ánimo necesario para cristalizar ideales que pueden convertirse en realidades.

A mis demás docentes que conformaron mi currícula académica, quienes con todas sus lecciones (de la carrera o de la vida) me brindaron enseñanzas que las llevo en mi diario vivir.

A mi madre, Seida, quien supo tenerme paciencia y guiarme por la senda que me ha permitido llegar a donde estoy ahora, además con su amor, me reconfirma que, si no vives para servir, no sirves para vivir.

A mi padre, Jorge, quien, a través de su forma tan única de demostrar su cariño y preocupación, me mostró que a veces la verdadera lucha no es contra el mundo, sino con un mismo y que, la podemos ganar si tenemos la férrea convicción de seguir adelante.

A mi hermano Cristian, quien día tras día, me he mostrado ejemplos de lucha y valor, le agradezco por enseñarme tantas cosas y sobre todo apoyarme en todas mis locuras. Y cuando leas esto, recuerda que siempre contarás conmigo para todo lo que necesites.

A mi hermana Jeniffer, por sus muestras de apoyo, fe y risas que me ha brindado. Espero muy pronto brilles con luz propia, porque no he perdido la fe en ti y cuentas conmigo, si así lo deseas.

A Zulay (y a esto involucro a Dios de por medio), por conocerte en el momento indicado y que con toda la felicidad del mundo que me brindaste junto a tu fuerza, apoyo, fe, cuidados y

motivaciones, me ha ayudado a cumplir esta meta. De verdad, ni estas letras ni los espacios en documentos me alcanzarán para agradecerte y decirte lo especial que eres.

A todos mis amigos que me han acompañado en diferentes etapas de mi vida, desde Katy Pérez (quien desde el colegio ha sido una amiga super genial), Dennis Viteri y Diego Caizaguano (con quienes he compartido momentos únicos antes de ser parte de la universidad como tal), Guillermo Asqui, Fernanda Castro, Geovanna Mosquera y Silvana Changoluisa (mis amigos de carrera, quienes frente a diferentes circunstancias coincidíamos en muchas cosas y hemos compartido mucho de otras, en resumen), hasta Yomi Quinga, Vivi Tibán y demás personas con las que pude compartir los últimos semestres de mi carrera( con quienes he tenido cercanía y muchas aventuras interesantes). A todos ellos, gracias infinitas por su amistad, apoyo y hacer la vida universitaria, una experiencia genial.

## Índice de Contenido

<b>Urkund.....</b>	<b>2</b>
<b>Certificación.....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de Autoría .....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de publicación.....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>7</b>
<b>Índice de Contenido .....</b>	<b>9</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>15</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>16</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>19</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo I Introducción.....</b>	<b>21</b>
Antecedentes .....	21
Estudios relacionados .....	25
Planteamiento del problema.....	26
Justificación e Importancia .....	27
Área de estudio.....	27
<i>Actividad sísmica en el Ecuador.....</i>	<i>28</i>
Actividad por fuente sísmica.....	31
<i>Fuente sísmica de interfase.....</i>	<i>31</i>
<i>Fuente sísmica in-slab o profunda.....</i>	<i>32</i>
<i>Fuente sísmica cortical (continental).....</i>	<i>33</i>

	10
Actividad por regiones fisiográficas. ....	34
Objetivos.....	37
<i>Objetivo General</i> .....	37
<i>Objetivos específicos</i> .....	37
Metas.....	37
Hipótesis.....	38
<b>Capítulo II Marco Teórico.....</b>	<b>39</b>
Generalidades de Sismología.....	39
<i>Sismo, Terremoto y Temblor</i> .....	40
<i>Clasificación de los sismos</i> .....	43
Sismos según su origen.....	44
<i>Sismos Naturales</i> .....	44
<i>Sismos Artificiales</i> .....	45
Sismos según su profundidad.....	45
<i>Ondas sísmicas</i> .....	46
Ondas sísmicas Internas, de Cuerpo o Volumétricas.....	46
Ondas sísmicas Superficiales.....	47
<i>Parámetros físicos para la caracterización de terremotos o sismos</i> .....	49
Localización espacial y temporal.....	49
Tamaño del evento sísmico.....	51
Catálogo sísmico.....	54
<i>Magnitud local (M<sub>L</sub>)</i> .....	55

<i>Magnitud de ondas internas, de volumen o cuerpo (<math>M_B/M_b</math>)</i> .....	55
<i>Magnitud de ondas superficiales (<math>M_S</math>)</i> .....	56
<i>Magnitud de Momento (<math>M_W</math>)</i> .....	56
<i>Otras magnitudes</i> .....	56
<i>Procedimientos necesarios para la homogenización de un catálogo sísmico</i> .....	57
Predicción sísmica o estimación de ocurrencia de sismos .....	58
<i>Precursores sísmicos</i> .....	58
Clasificación de los precursoros sísmicos .....	59
<i>Precursores según la naturaleza de la variable</i> .....	60
<i>Precursores según la correlación con los sismos</i> .....	63
<i>Métodos de predicción sísmica</i> .....	64
<i>Temporalidad de la predicción</i> .....	65
Predicciones o estimaciones a corto plazo .....	66
Predicciones o estimaciones a mediano plazo .....	66
Predicciones o estimaciones a largo plazo .....	66
Algoritmo M8 .....	67
<i>Determinación del área de investigación</i> .....	69
<i>Funciones</i> .....	70
Función N o Flujo de la actividad sísmica .....	70
Función L o Desviación de la Actividad a largo plazo .....	70
Función Z, Concentración o Interacción de los Terremotos .....	71

	12
Función B, Concentración o Interacción de los Terremotos.....	71
<i>Parámetros, normalización de la actividad sísmica y declaración de Tiempos de Incremento de probabilidad (TIP)</i> .....	72
Lógica Difusa .....	73
<i>Definición matemática</i> .....	73
<i>Funciones de pertenencia o membresía</i> .....	74
<i>Clasificación de las funciones de pertenencia o membresía</i> .....	75
<b>Capítulo III Metodología .....</b>	<b>79</b>
Descripción general de la metodología .....	79
Elaboración del catálogo sísmico .....	79
<i>Recopilación de la información</i> .....	79
<i>Homogenización del catálogo sísmico</i> .....	84
<i>Depuración del catálogo sísmico</i> .....	87
Evaluación del método de depuración del catálogo sísmico .....	89
<i>Compleitud del catálogo sísmico</i> .....	92
Magnitud de completitud.....	92
Temporalidad del catálogo sísmico. ....	93
Cálculo del Algoritmo M8 .....	95
<i>Breve descripción del proceso para el cálculo del algoritmo</i> .....	95
<i>Determinación de la magnitud objetivo y temporalidad</i> .....	97
<i>Análisis retrospectivo</i> .....	98
Determinación del Círculo de Investigación (CI). ....	98

Determinación de parámetros idóneos a la zona de estudio.....	99
Análisis combinatorios entre CI y parámetros.....	100
<i>Análisis prospectivo</i> .....	104
<i>Propuestas para optimización de zona de alerta declarada por TIP</i> .....	107
Propuesta usando herramientas geoespaciales .....	107
Propuesta usando Estadística .....	109
Cálculo de Lógica Difusa.....	109
<i>Recopilación de información</i> .....	110
<i>Espacialización de variables</i> .....	111
Densidad Sísmica.....	111
Tasa de recurrencia sísmica.....	111
Réplicas asociadas a sismos principales.....	114
Fallas sísmicas.....	114
<i>Aplicación de funciones de pertenencia o membresía</i> .....	116
<i>Superposición Difusa</i> .....	117
<b>Capítulo IV Resultados</b> .....	<b>119</b>
Catálogo sísmico del proyecto .....	119
<i>Análisis de completitud</i> .....	121
<i>Análisis inicial complementario</i> .....	121
Aplicación del Algoritmo M8 .....	123
<i>Parámetros idóneos para el algoritmo M8 en la zona de estudio</i> .....	123
<i>Análisis prospectivo en cada CI</i> .....	124

CI #1 .....	124
CI #2 .....	125
CI #3 .....	125
CI #4 .....	125
CI #5 .....	126
CI #6 .....	126
CI #7 .....	126
CI #8 .....	126
CI #9 .....	126
CI #10.....	126
<i>Área de alerta generada.....</i>	<i>127</i>
<i>Propuesta para la optimización de la zona de alerta a través de herramientas geoespaciales .....</i>	<i>128</i>
<i>Propuesta para la optimización de la zona de alerta a través de Estadística.....</i>	<i>130</i>
Aplicación de Lógica Difusa .....	131
<i>Zonas de alerta generadas .....</i>	<i>134</i>
Comparativa entre ambas metodologías.....	136
<b>Capítulo V Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>138</b>
Conclusiones .....	138
Recomendaciones .....	140
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>141</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>155</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Características de los sismos según su profundidad .....	45
<b>Tabla 2</b> Principales parámetros registrados en un catálogo sísmico .....	55
<b>Tabla 3</b> Saturación de las diferentes magnitudes .....	57
<b>Tabla 4</b> Predicciones con sus posibles medidas de mitigación .....	67
<b>Tabla 5</b> Simbología para la relación entre Sismicidad y Funciones .....	71
<b>Tabla 6</b> Evaluación de las fuentes de información sísmica.....	81
<b>Tabla 7</b> Campos usados para el catálogo sísmico del proyecto .....	83
<b>Tabla 8</b> Consideraciones para la homogenización del catálogo sísmico .....	87
<b>Tabla 9</b> Límites espaciales y temporales para la depuración del catálogo sísmico.....	90
<b>Tabla 10</b> Evaluaciones realizadas a la depuración sísmica del proyecto.....	91
<b>Tabla 11</b> Valores considerados como posibles CI del proyecto.....	99
<b>Tabla 12</b> Variaciones en los Límites de las funciones para el Algoritmo M8 .....	100
<b>Tabla 13</b> Parámetros y argumentos usados para el análisis retrospectivo .....	101
<b>Tabla 14</b> Primer análisis retrospectivo del Algoritmo M8 .....	102
<b>Tabla 15</b> Resumen de la segunda evaluación retrospectiva al Algoritmo M8 .....	104
<b>Tabla 16</b> Asignación de funciones de pertenencia a las variables de análisis .....	116
<b>Tabla 17</b> Estadísticos y relaciones calculadas para el catálogo sísmico del proyecto. ....	119
<b>Tabla 18</b> Porcentaje de sismos existentes por magnitud en el catálogo sísmico del proyecto .....	120
<b>Tabla 19</b> Completitud de los intervalos de magnitud para el catálogo sísmico del proyecto .....	121
<b>Tabla 20</b> Parámetros determinados como idóneos para el proyecto .....	123
<b>Tabla 21</b> Resumen de los resultados encontrados en cada CI.....	127
<b>Tabla 22</b> Comparaciones entre el Algoritmo M8 y Lógica Difusa.....	136

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Mapa del área epicentral, sismo ocurrido en 1975.....	24
<b>Figura 2</b> Ubicación del Ecuador Continental .....	28
<b>Figura 3</b> Límite de las Placas Tectónicas.....	29
<b>Figura 4</b> Fallas activas en el Ecuador .....	30
<b>Figura 5</b> Número de sismos ocurridos desde el año 2000 .....	31
<b>Figura 6</b> Fuentes sísmicas de Interfase .....	32
<b>Figura 7</b> Fuentes sísmicas In-slab .....	33
<b>Figura 8</b> Fuentes sísmicas Corticales .....	34
<b>Figura 9</b> Regiones y subregiones fisiográficas.....	35
<b>Figura 10</b> Daños causados por terremotos en Ecuador .....	36
<b>Figura 11</b> Proceso que describe la Teoría de Rebote Elástico.....	40
<b>Figura 12</b> Elementos que intervienen en un terremoto o sismo.....	42
<b>Figura 13</b> Infografías presentadas por diferentes instituciones .....	43
<b>Figura 14</b> Clasificación de los sismos según su origen y profundidad.....	44
<b>Figura 15</b> Vista gráfica de la Onda Primaria (P).....	46
<b>Figura 16</b> Vista gráfica de la Onda Secundaria (S) .....	47
<b>Figura 17</b> Vista gráfica de la Onda Rayleigh.....	48
<b>Figura 18</b> Vista gráfica de la Onda Love .....	48
<b>Figura 19</b> Isoistas del terremoto de Torrevieja, España. 1829 .....	49
<b>Figura 20</b> Método gráfico para la ubicación del epicentro .....	50
<b>Figura 21</b> Equivalencias entre diferentes escalas de Intensidad .....	53
<b>Figura 22</b> Relación entre la Escala Richter y carga de dinamita TNT.....	54
<b>Figura 23</b> Procedimiento para la realización de un Catálogo Sísmico.....	58
<b>Figura 24</b> Clasificación de precursores sísmicos .....	59
<b>Figura 25</b> Anomalía térmica antes de un sismo, India.....	61

<b>Figura 26</b> Identificación de la Brecha sísmica de Guerrero México .....	62
<b>Figura 27</b> Relación entre precursores, su tiempo y la magnitud sísmica .....	64
<b>Figura 28</b> PSP observados antes de un gran terremoto.....	68
<b>Figura 29</b> Esquema básico del Algoritmo M8.....	69
<b>Figura 30</b> Ejemplos de funciones de pertenencia o membresía .....	75
<b>Figura 31</b> Función de pertenencia lineal .....	75
<b>Figura 32</b> Función de pertenencia sinusoidal.....	76
<b>Figura 33</b> Función de pertenencia Gaussiana.....	76
<b>Figura 34</b> Segundo caso de funciones sinusoidales .....	77
<b>Figura 35</b> Tercer caso de funciones sinusoidales .....	78
<b>Figura 36</b> Catálogos sísmicos de las fuentes y su resultado previo .....	82
<b>Figura 37</b> Esquema utilizado para la confección del catálogo sísmico .....	84
<b>Figura 38</b> Entorno visual de Zmap .....	88
<b>Figura 39</b> Entorno de trabajo en RStudio.....	89
<b>Figura 40</b> Método gráfico para la completitud del catálogo sísmico .....	93
<b>Figura 41</b> Análisis de completitud por el método de Stepp.....	95
<b>Figura 42</b> Cálculo del Algoritmo M8 con parámetros por defecto .....	96
<b>Figura 43</b> Proceso para el cálculo del Algoritmo M8 en el proyecto .....	96
<b>Figura 44</b> CI para análisis retrospectivos del proyecto .....	99
<b>Figura 45</b> Ubicación de los sismos considerados para segunda evaluación .....	103
<b>Figura 46</b> Ubicación de CI para análisis prospectivo.....	105
<b>Figura 47</b> Series resultantes de un CI en evaluación prospectiva .....	106
<b>Figura 48</b> Herramienta para el cálculo de la densidad de sismos .....	108
<b>Figura 49</b> Densidad sísmica de la zona de estudio .....	108
<b>Figura 50</b> Proceso para la aplicación de Lógica Difusa.....	110
<b>Figura 51</b> Fallas geológicas en el territorio ecuatoriano .....	111

<b>Figura 52</b> Herramienta usada para el cálculo de la tasa de recurrencia sísmica.....	112
<b>Figura 53</b> Herramienta usada para la interpolación de variables.....	113
<b>Figura 54</b> Recurrencia sísmica en la zona de estudio.....	113
<b>Figura 55</b> Réplicas asociadas a sismos principales .....	114
<b>Figura 56</b> Herramienta para el cálculo de Distancia Euclidiana.....	115
<b>Figura 57</b> Distancia a fallas sísmicas en la zona de estudio .....	115
<b>Figura 58</b> Herramienta usada para la asignación de valores difusos .....	117
<b>Figura 59</b> Herramienta usada para la Superposición Fuzzy o Difusa .....	117
<b>Figura 60</b> Relación entre tipos de Superposición Difusa y el exponente Gamma.....	118
<b>Figura 61</b> Catálogo sísmico del proyecto .....	120
<b>Figura 62</b> Análisis inicial estadístico para el catálogo sísmico del proyecto.....	122
<b>Figura 63</b> Simbología usada en las series de tiempo .....	124
<b>Figura 64</b> Zona de alerta por la ocurrencia de un terremoto calculada a través del Algoritmo M8 .....	128
<b>Figura 65</b> Optimización de la zona de alerta a través de herramientas geoespaciales	129
<b>Figura 66</b> Optimización de la zona de alerta a través de Estadística .....	130
<b>Figura 67</b> Valores de pertenencia para Densidad Sísmica.....	131
<b>Figura 68</b> Valores de pertenencia para Tasa de recurrencia sísmica.....	132
<b>Figura 69</b> Valores de pertenencia para Réplicas sísmicas .....	133
<b>Figura 70</b> Valores de pertenencia para Distancia a fallas sísmicas.....	134
<b>Figura 71</b> Zonas de alerta definidas por Lógica Difusa .....	135

## Resumen

La estimación o predicción de ocurrencia de eventos sísmicos, ha sido una de las ramas de investigación que ha tenido un auge considerable en décadas recientes. En Latinoamérica y, especialmente, Ecuador, los estudios técnico-científicos son escasos y su aplicación ha sido considerablemente baja, por tanto, el presente proyecto propone la comparación de la estimación de ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud (7Mw+) a mediano plazo (5 años), por el Algoritmo M8 (metodología usada a nivel mundial con resultados concluyentes) o también por Lógica Difusa, con ello, probar la eficiencia de éste último en la predicción sísmica por su mayor utilidad y compatibilidad con los SIG. Se realizó una recopilación de diversas fuentes de información sísmica y se ha construido un catálogo sísmico para el territorio ecuatoriano con 57 años de completitud, con ello se han realizado análisis retrospectivos y prospectivos con el Algoritmo M8, mostrando que en la zona Sierra centro y Oriente existe una alta probabilidad de ocurrencia sísmica, dada la amplia zona de alerta, se han considerado 2 optimizaciones a través de Densidad Sísmica y Función Binomial. Para la aplicación de Lógica Difusa se describieron 4 variables fundamentales, las cuales, mostraron coincidencias con el Algoritmo M8, pero su área de alerta es mucho menor y detallada. Se concluye que, ambas metodologías pueden ser usadas como complementarias, es decir, la Lógica Difusa puede ser una optimización para el Algoritmo M8, considerando este proyecto como una base para estudios de mayor profundidad y de mayor alcance en Sismología.

### **PALABRAS CLAVE**

- **PREDICCIÓN**
- **ALGORITMO M8**
- **LÓGICA DIFUSA**

### **Abstract**

The estimation or prediction of the occurrence of earthquakes has been one of the research branches that has had a considerable rising in recent decades. In Latin America and, especially, Ecuador, technical-scientific studies are limited and their application has been considerably low, therefore, this project proposes the comparison of the estimation of occurrence of large-magnitude seismic events (7Mw +) in medium-term (5 years), by M8 Algorithm (methodology used worldwide with conclusive results) or also by Fuzzy Logic, thereby testing the efficiency of the last one in seismic prediction due to its greater utility and compatibility with GIS. A compilation of different sources of seismic information was made and a seismic catalog has been built for the Ecuadorian territory with 57 years of completeness, with this, retrospective and prospective analyzes have been carried out with the M8 Algorithm showing an area with high probability of seismic occurrence in Oriental and Center Highlands Regions, by a wide alert zone, 2 optimizations have been considered through Seismic Density and Binomial Function. In Fuzzy Logic application, 4 fundamental variables were described, which showed coincidences with the M8 Algorithm, but their alert area is smaller. In conclusion, both methodologies can be used as complementary so Fuzzy Logic can be an optimization for Algorithm M8, considering this project as a basis for more in-depth and far-reaching studies in Seismology.

### **KEYWORDS**

- **PREDICTION**
- **M8 ALGORITHM**
- **FUZZY LOGIC**

## Capítulo I

### Introducción

En este capítulo se describen los antecedentes, estudios relacionados, planteamiento del problema a tratar, área de estudio, así también como, los objetivos, metas e hipótesis para el presente proyecto de investigación, todos ellos realizados a través de una exploración y validación minuciosas.

#### Antecedentes

La Sismología es una ciencia derivada de la Geofísica, la cual forma parte de las Ciencias de la Tierra, que estudia las observaciones de los movimientos naturales en un espacio, las señales emitidas por estas y sus aplicaciones. Se deriva en dos tipos de investigaciones esenciales, de la cual la primera está enfocada en la propagación de las ondas junto a la estructura de la Tierra y, la otra que estudia los fenómenos asociados a dichas ondas, tales como desplazamiento de fallas, geometría del área, energía liberada, estudios de predicción de eventos sísmicos, entre otros (Pavlis, 2003; Vera, 2003)

A través de la historia de la humanidad, la interrogante sobre el origen y ubicación de los terremotos ha sido investigada y, según la época, las ideas han ido evolucionando; en un principio se los vinculaban a costumbres o creencias religiosas o han sido atribuidas a acciones de los Dioses, por ejemplo, Poseidón en la mitología griega, Namazu en el folclor japonés, El Quinto Sol o la desaparición de Nahui Ollin en la cultura Azteca, entre otros; posteriormente, filósofos presocráticos y Aristóteles, trataban de explicarlo a través de la ciencia, postulando que eran producidos por masas de aire caliente que salían del interior de la Tierra (Suzuki, 1996; Herráiz, 1997; Güney, 2015).

Para el año 1668, se presentaban los primeros estudios y recopilaciones de información relacionada a los terremotos, además que, Robert Hooke en su "Discurso

sobre Terremotos” describiría que un sismo ocurre por una respuesta de tipo elástica frente a fenómenos geológicos, consideración que causó grandes avances y mayores motivaciones para estudiar dichos fenómenos, además que, para esa época ya se hacían relaciones entre las fallas geológicas observables y la ocurrencia de sismos (Gallego Silva, 2003).

No sería hasta el siglo XIX cuando ya se hicieran mayores avances en la determinación del origen y ocurrencia de un sismo, ya que, Alexander von Humboldt y en concordancia con los ideales del siglo XVII, concluye que los sismos también tienen un origen térmico, ligados a erupciones volcánicas, dicha premisa no fue compartida por Robert Mallet, quien (con ayuda de su hijo) realizase un catálogo de terremotos a nivel mundial entre los años 1852 y 1854 y un mapa sísmico mundial para el año 1857 y que, por todos sus aportes es considerado en la actualidad como el padre de la Sismología Moderna (von Humboldt, 1835; Instituto Nacional de Prevención Sísmica, s.f).

A finales del siglo XIX, y gracias a las diferentes investigaciones realizadas durante esa época, se acepta de manera más común que un evento sísmico se originaba por un movimiento relativo entre 2 partes de una fractura (o falla) en la corteza terrestre, dicho movimiento fue modelado inicialmente por Harry Reid en 1911, en el cual se deduce que los sismos son resultado de una deformación elástica y acumulación de esfuerzos en una zona específica de la corteza, conocida en la actualidad como el Modelo del Rebote Elástico (Reid, 1911; Reid, 1914; Reid & Taber, 1919) (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, s.f).

Mientras se discutía acerca de la forma de modelar cómo ocurre un sismo a través del modelo mencionado anteriormente y responder a incertidumbres que aún mostraba, se empieza a construir la idea de buscar una forma de estimar o predecir la ocurrencia de un sismo en un determinado lugar en específico, por ejemplo, Milne en 1880 proponía como precursores de un evento sísmico a las condiciones climáticas,

comportamiento animal, alteraciones eléctricas, movimientos de masas, variaciones en la temperatura de aguas termales y microterremotos (Geller, 1997).

El Modelo de Rebote Elástico también fue otro puntal que brindaría un aporte importante para la predicción de sismos ya que, su mismo autor mencionaba que una predicción sísmica podría ser efectiva si se elaborara un método para determinar acumulación de esfuerzos en sismos tectónicos, y a la vez, sugería que una manera de hacerlo sería ubicando equipos con alta sensibilidad a aproximadamente 1km de distancia de la falla a evaluar (Kanamori, 2003).

En la primera mitad del siglo XX, se realizaron algunas investigaciones, en las que se sumaron más precursores de los mencionados en 1880, tal es el caso de anomalías geodésicas o variaciones de tipo lumínicas, entre otras; todas ellas con gran sustento teórico pero sin una comprobación o explicación válida para los científicos de aquella época, pero, lo único en que toda la comunidad científica coincidía, era que es imposible determinar precursores de eventos sísmicos con gran precisión y exactitud, lo que implicaba que la predicción de sismos estaba muy lejos de su alcance.

Para la década de 1960, se buscaban otras formas para determinar la ubicación de un sismo en un zona determinada a través de correlaciones de todos los datos acumulados de sismos ocurridos, mientras que en Estados Unidos se proponía una búsqueda empírica de precursores a gran escala, por medio del uso de instrumentos de precisión para recopilar mayor información y empatar los datos con la posible ocurrencia de sismos de gran magnitud, todo esto a través de una o más técnicas que se puedan desarrollar (Geller, 1997).

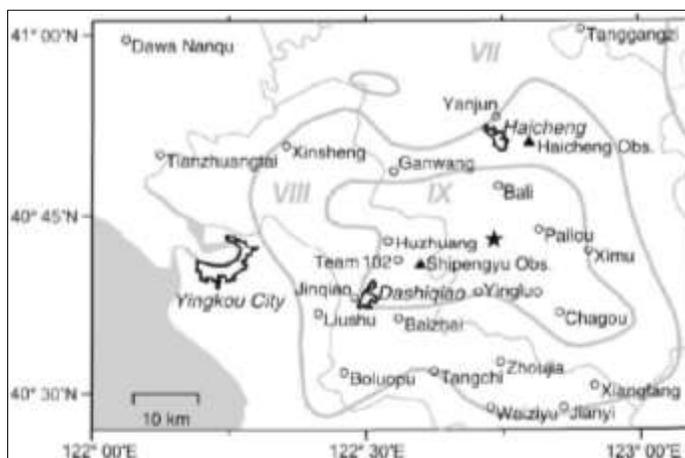
A partir de las iniciativas del mundo científico de esa época empezaron a surgir un sinnúmero de estudios y centros de investigación de varias naciones que se enfocaron en la búsqueda de una metodología óptima para predecir sismos; en primera instancia los científicos instaron en predicciones a un período amplio de tiempo y,

mientras la tecnología avanzaba ya surgían nuevas propuestas para reducir los espacios temporales de la estimación de sismos, pero eso sí, con resultados muy dispersos y hasta en algunos casos, insatisfactorios, pero se mantenía el optimismo para llegar a conclusiones positivas.

Cabe destacar una predicción exitosa que fue hecha a través de 4 etapas (largo plazo, mediano plazo, corto plazo e inminente) realizada en la ciudad de Haicheng, China, como se observa en la Figura 1, que ocurrió en el año 1975, donde el principal precursor fueron sismos de menor magnitud, además de otras variables tales como: cambios químicos en aguas subterráneas, variaciones en la medición del elemento Radón, comportamiento extraño de especies de la localidad, entre otras. Los científicos dieron la alerta de la ocurrencia del sismo a las 8:15 am del 4 de febrero de ese año, indicando que ese día existiría un sismo de gran magnitud y mientras más tarde ocurra, tendría mayor fuerza de impacto (si se producía a las 7pm tendría una magnitud 7 en escala Richter y si fuese a las 8pm, una magnitud de 8), finalmente ocurrió a las 7:36 pm con una magnitud 7.3, reportando cerca de 2000 fallecidos, pero salvando cerca de 100.000 vidas (Ramírez, 2012).

### Figura 1

*Mapa del área epicentral, sismo ocurrido en 1975*



*Nota.* Tomado de Wang, Chen, Sun, & Wang (2006).

En la actualidad, los estudios de predicción sísmica han tenido una mayor relevancia (pese a no tener resultados concluyentes) por el uso de nuevas tecnologías y una mayor facilidad en la captura de datos, por ello, la espacialización de variables en apoyo a las metodologías existentes aportaría de manera eficaz en el camino hacia la estimación de ocurrencia de un evento sísmico en un área de la corteza terrestre determinada, además de mejorar los modelos de peligro sísmico, que evalúan y analizan los fenómenos primarios y secundarios que se presentan en un sismo para definir las fuerzas que deben resistir las edificaciones, busca contestar preguntas técnicas que aporten a su estudio, una de ellas está enfocado a identificar los lugares que han ocurrido, ocurren y posiblemente ocurran eventos sísmicos (Hays , 1991).

### **Estudios relacionados**

Específicamente, en la predicción de eventos sísmicos, Tapia-Hernández (2013) difunde un compilado de resultados sobre investigaciones en predicción sísmica a nivel mundial, con ello, el autor busca sumar esfuerzos que brinden bibliografía necesaria para futuros estudios. El autor destaca que los métodos de predicción de tipo estadísticos, han brindado predicciones más acertadas que los realizados a través de variables físicas y que, pese a que no se tenga certeza aún sobre una metodología idónea para la predicción sísmica, es importante continuar en la investigación sobre este tema (Tapia-Hernández, 2013).

Por otro lado, Kanamori (2003) realiza grandes aportes acerca de la predicción sísmica y su impacto en la gestión de riesgos o mitigación de daños, donde describe grandes avances en métodos predictivos a corto plazo y toma como ejemplo el sismo ocurrido en la ciudad de Haicheng (China), donde a través de patrones de sismicidad que se identificaron 3 días antes, se pudo evacuar a la población y ocurrió un sismo de magnitud 7.3Mw, donde hubiese existido una catástrofe sin la pronta acción de las autoridades y, concluyendo que los esfuerzos para evaluar la sismicidad por diferentes

maneras puede aportar de manera significativa a la supervivencia de zonas vulnerables y, junto a las predicciones (correctas o no) se puede obtener mejores respuestas para una adecuada Gestión de Riesgos y del Territorio.

En Sudamérica, Flores (2011) realizó la aplicación del algoritmo M8 en el borde occidental peruano para así obtener una predicción de terremotos a un plazo intermedio (5 años), junto a un análisis retrospectivo para determinar qué eventos ya ocurridos son detectados por el algoritmo y señala su uso en otras naciones con resultados destacables, pese a todo aquello, el autor concluye que, para predicciones a corto plazo aún no existe alguna metodología que lo realice, pero, las predicciones de mediano plazo aún son una medida paliativa o preventiva para la mitigación de los efectos producidos por eventos sísmicos.

Hablando específicamente de Ecuador, pese a que el ente rector sobre la sismicidad en el país muestre Informes Sísmicos, los cuales señalan que existen seguimientos de la actividad sísmica por métodos GPS o probabilidad de ocurrencia (Instituto Geofísico-EPN, 2016). Estos son presentados a la población después de ocurrido el evento y, no se muestra una metodología que pueda ayudar a que investigadores puedan enriquecer y realizar estudios profundos sobre sismos en el país.

### **Planteamiento del problema**

En América Latina y en el Ecuador en particular, las instituciones encargadas del monitoreo de sismos no realizan estimaciones estadísticas de ocurrencia de sismos a mediano y largo plazo, con excepción de Perú que ha realizado estimaciones estadísticas a mediano plazo usando solamente el Algoritmo M8; por lo tanto, este estudio pretende investigar si el Algoritmo M8 y la Lógica Difusa permiten también realizar este tipo de estimaciones en el Ecuador, en razón de que este último es de uso más amplio y compatible con los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

## **Justificación e Importancia**

El Algoritmo M8, según los estudios realizados en otros países, es uno de los algoritmos más confiables en la estimación de ocurrencia de sismos a mediano plazo (Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov, 2014). Pese a la efectividad mostrada, la aplicación de dicho algoritmo ha sido mínima o casi nula en Sudamérica, salvo un estudio realizado por Flores (2011) en la costa peruana, por ello, en Ecuador, sería la primera vez que se usará tal algoritmo, por ello denotaría un mayor interés para la comunidad científica que se especializa en Sismología.

Por otro lado, la Lógica Difusa, que nació en el año de 1965, es una metodología que, por su gran acoplamiento con los Sistemas de Información Geográfica a través de los años ha presentado una gran relevancia para resolver problemáticas geoespaciales de muchas ramas (Preethi & Santhi, 2011). Lo anterior descrito lleva a considerar que, es importante el estudio de la Lógica Difusa en la Sismicidad y, en este caso, en la estimación de ocurrencia de sismos, para así probar su posible efectividad en estos propósitos.

Finalmente, al realizar la comparación de ambas metodologías, se puede dar un aporte hacia la aplicación de la estimación de ocurrencia de sismos y difundirlo de manera eficaz a través de metodologías más usadas dentro de los expertos SIG, como lo es la Lógica Difusa y, a la vez brindar apertura a estudios más profundos dentro de la Predicción de sismos en el Ecuador, considerando que esta zona posee una alta amenaza a eventos sísmicos de gran magnitud (Toulkeridis et al., 2017; Toulkeridis et al., 2018; Toulkeridis et al., 2019).

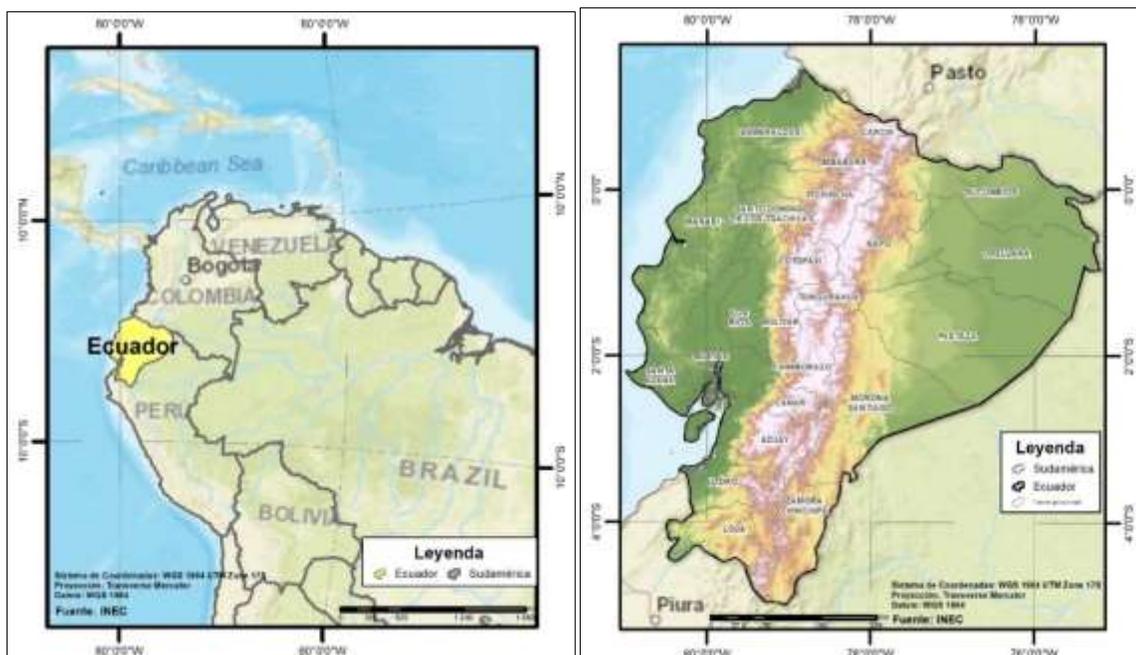
## **Área de estudio**

Ecuador, en territorio continental, se encuentra ubicado en América del Sur entre las latitudes 1°30'N, 3°23,5'S, y longitudes 81°W, 75°12'W (ver Figura 2), limitando al norte con Colombia, al este y sur con Perú y al oeste con el Océano Pacífico, con una

superficie de 262.826 Km<sup>2</sup>, posee un relieve variado y con ello le brinda una amplia diversidad de subclimas (Instituto Oceanográfico-Armada del Ecuador, 2005).

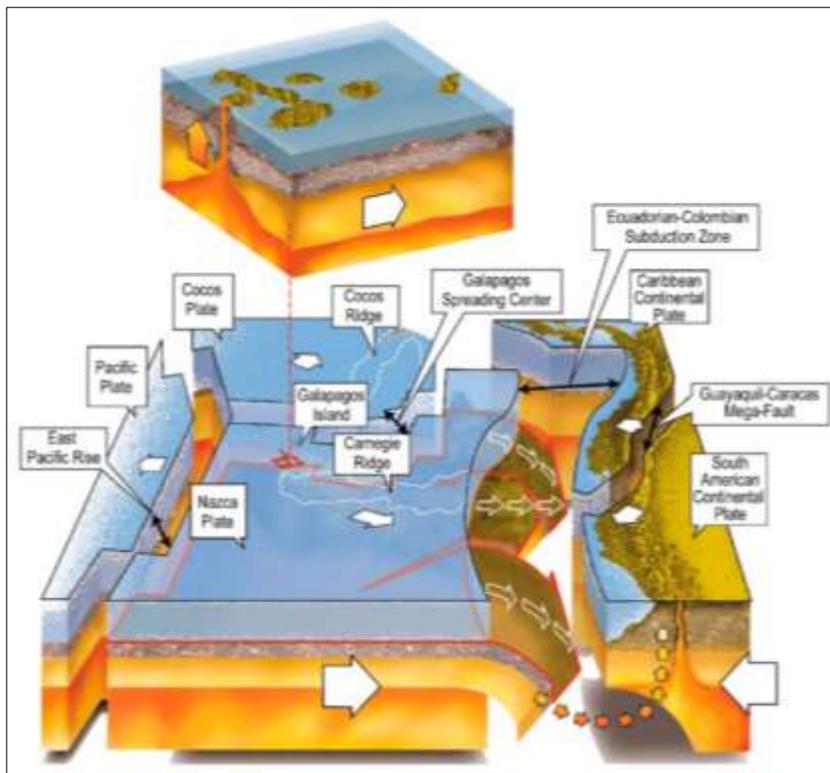
## Figura 2

### *Ubicación del Ecuador Continental*



### ***Actividad sísmica en el Ecuador***

Por su ubicación geográfica, Ecuador, tectónicamente, se encuentra entre 2 sectores, uno se sitúa en la microplaca llamada Bloque Andino, que pertenece a la placa Sudamericana, e interactúa con las placas de Nazca, Cocos y Caribe mientras que la parte sur del país se encuentra en la interacción de las placas Sudamericana y Nazca, como se puede visualizar en la Figura 3.

**Figura 3***Límites de las Placas Tectónicas*

*Nota.* Recuperado de Taipe (2013)

Por la geodinámica que presentan ambos sectores se ha generado varios sistemas sistema de fallas geológicas, una principal, denominada Sistema Mayor Dextral y 2 secundarias; aunque se destaca otro elemento llamado la mega-falla geológica Guayaquil-Caracas, según lo describe Acosta et al (2016), las cuales junto a los procesos de subducción que ocurren en la costa, son las fuentes principales de los eventos sísmicos en el país (Quinde & Reinoso, 2016; Parra, 2016). Las fallas activas en territorio ecuatoriano se muestran en la Figura 4.

## Figura 4

### *Fallas activas en el Ecuador*

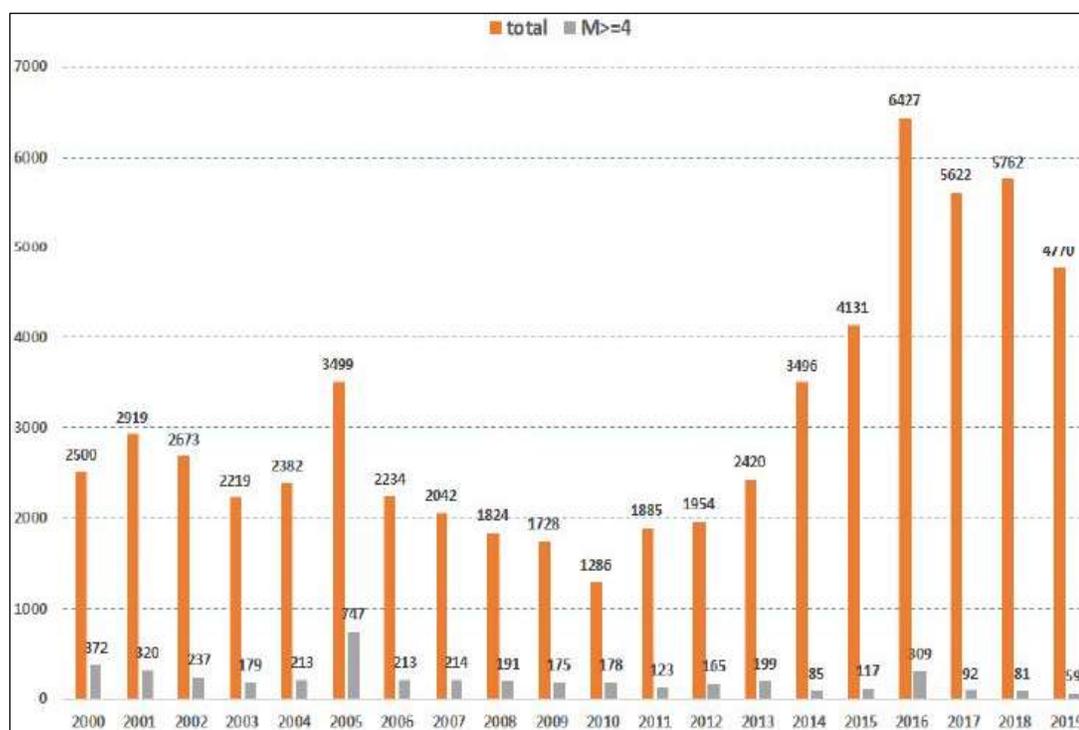


*Nota.* Recuperado de Egeuz et al. (2003)

Por otro lado, el número de eventos sísmicos que han existido en territorio ecuatoriano, han sido registrados, en primera instancia, por historiadores y a través de crónicas históricas, en el siglo XIX se realizaban boletines tectónicos de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico de Quito y, desde el año 1983 el Instituto Geofísico (IG-EPN) ha tenido a cargo dichas funciones, con ello, a partir del año 2000 se tienen informes sísmicos anuales con registros instrumentales de mayor precisión y detalle; para el año 2019 (el más reciente), se detectaron 4770 eventos sísmicos de origen tectónico, de ellos, 59 registraron una magnitud mayor o igual a 4 (Segovia, 2019). En la Figura 5, se muestra el número de eventos sísmicos ocurridos en el país desde el año 2000.

**Figura 5**

Número de sismos ocurridos desde el año 2000



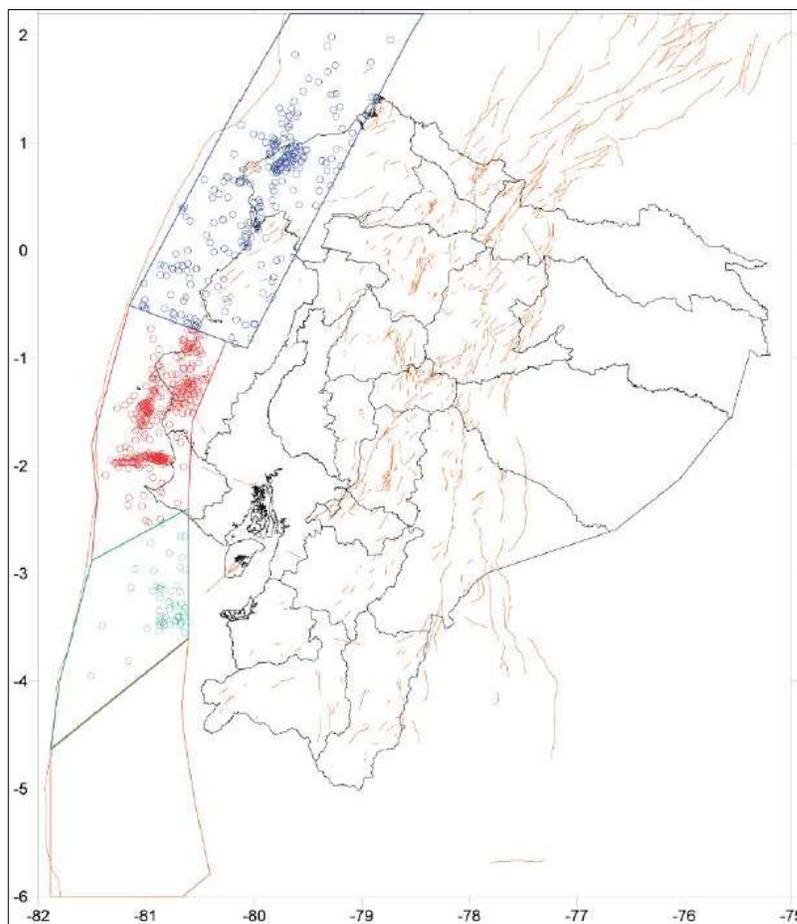
Nota. Recuperado del Informe sísmico para el año 2019. Segovia (2019).

**Actividad por fuente sísmica.** De los análisis realizados por diferentes investigaciones de tipo tectónicas y geofísicas, se han definido 3 tipos principales de fuentes sísmicas para el territorio continental ecuatoriano:

**Fuente sísmica de interfase.** Se ubica en la parte inicial de la zona de subducción con una profundidad de hasta 40-70 km y se caracteriza porque en esta zona se bloquea parcialmente el movimiento de la placa de Nazca, ocasionando la deformación de la placa que subduce y una mayor acumulación de tensión (Parra, 2016). Para el año 2019, se tuvo una actividad sísmica constante, salvo un evento de magnitud 6,1 Mw con sus respectivas réplicas (Segovia, 2019). Las zonas que forman esta fuente sísmica se visualizan en la Figura 6, con el número de eventos que ocurrieron en las mismas en el año 2019.

## Figura 6

### *Fuentes sísmicas de Interfase*

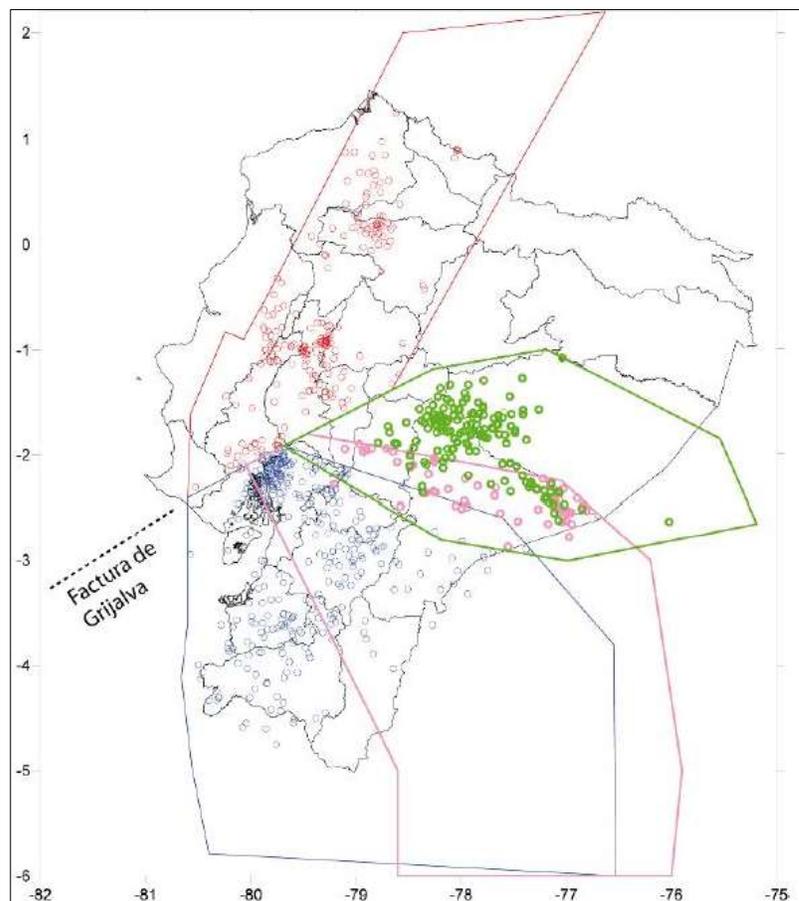


*Nota.* Tomado del Informe sísmico para el año 2019, realizado por Segovia (2019)

**Fuente sísmica in-slab o profunda.** Esta zona comienza desde el límite de la zona de interfase hasta 400-500 km al Este, llegando a tener profundidades de 200 km, presenta actividad sísmica a diferentes niveles de profundidad y un amplio arco volcánico por la presencia de la Cordillera de los Andes (Taípe, 2013). En el año 2019, se reportó una actividad constante en la mayoría de esta zona y con un aumento en la sismicidad a comparación del 2018 (Segovia, 2019). Las zonas que pertenecen a esta fuente se muestran en la Figura 7, con los eventos sísmicos ocurridos durante el año 2019.

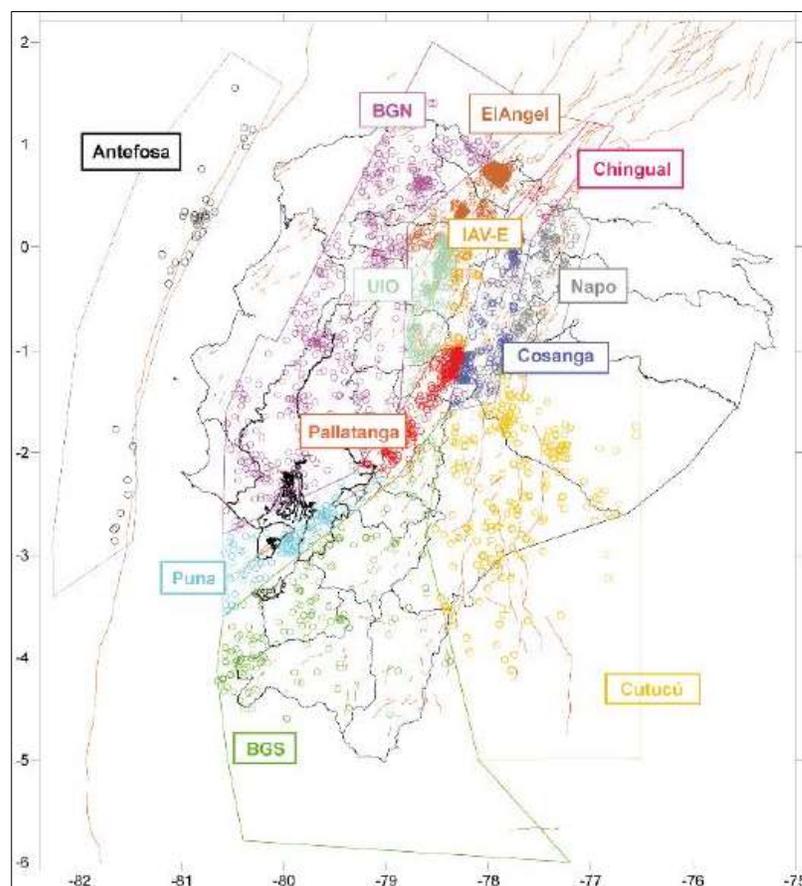
## Figura 7

### *Fuentes sísmicas In-slab*



*Nota.* Tomado del Informe sísmico para el año 2019, realizado por Segovia (2019)

**Fuente sísmica cortical (continental).** Se conforma por la placa Continental y el Bloque Andino con un posible sistema de fallas activo y cuya subducción influyen en su geomorfología, donde se evidencia una zona costera (40 km de profundidad), una de cordillera (50 a 75 km de profundidad) y una oriental en la que se forma la cuenca alta del río Amazonas (Taipe, 2013; Parra, 2016). En 2019, para la mayoría de zonas que conforman esta fuente se registra una actividad constante, exceptuando áreas del Valle Interandino donde se obtuvieron actividades sísmicas bajas (Segovia, 2019). En la Figura 8, se muestran las zonas corticales con el número de sismos ocurridos en 2019.

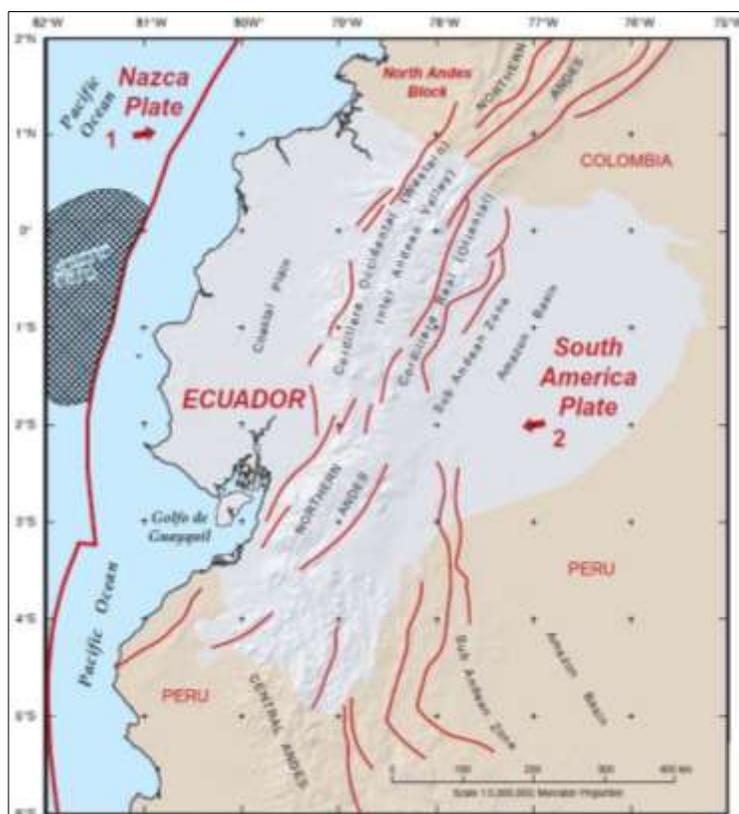
**Figura 8***Fuentes sísmicas Corticales*

*Nota.* Tomado del Informe sísmico para el año 2019, realizado por Segovia (2019)

**Actividad por regiones fisiográficas.** Las regiones fisiográficas son definidas por características de Relieve, Topografía y Geología, pero su actividad sísmica y por ende su amenaza sísmica difiere de diferentes parámetros como la composición y estructura del subsuelo, presencia de fallas activas en dicha región, entre otras; en Ecuador continental, Rivadeneira et al. (2007) describe que existen 3 regiones: Costera, Valle Interandino y Oriental (similares a las regiones que se conocen comúnmente). En la Figura 9, se muestran dichas regiones, además de las subregiones que la componen.

**Figura 9**

*Regiones y subregiones fisiográficas*



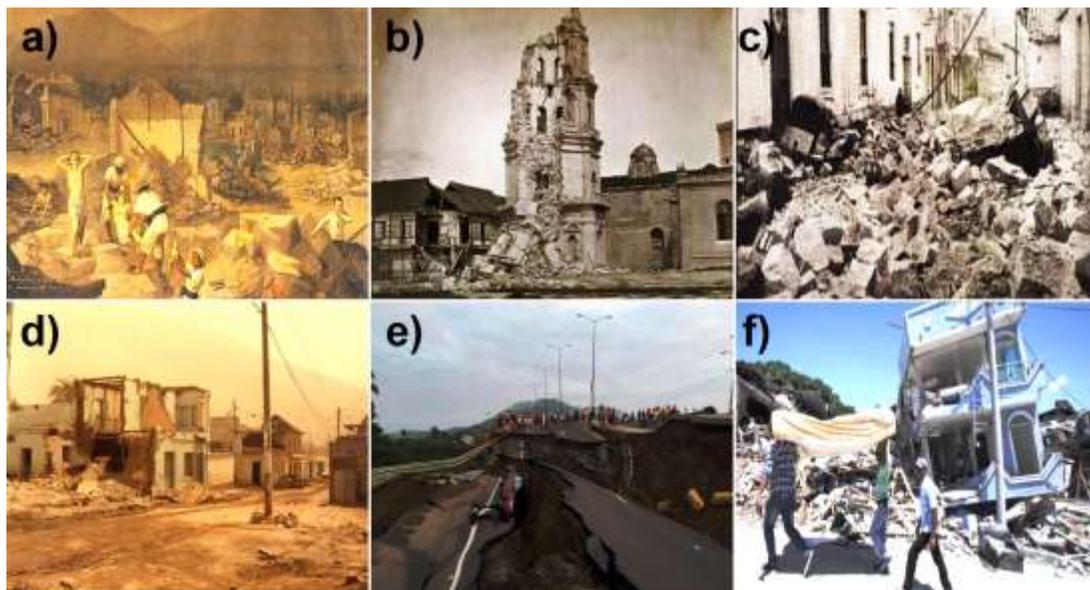
*Nota.* Recuperado de Egeuz et al. (2003)

La región costera tiene los registros de sismos con mayor magnitud que ha sufrido el país a lo largo de su historia, debido a la zona de subducción presente en la misma; en esta región han ocurrido sismos de grandes magnitudes, entre 7,1 a 8,8 Mw, siendo este último (ubicado en Esmeraldas) el mayor terremoto que refleja el Catálogo sísmico disponible en el IG-EPN, en cambio, la región del valle interandino concentra una alta tasa de sismos ocurridos y por ello registra daños colosales en diferentes zonas de la Sierra ecuatoriana, principalmente causados por su alta densidad poblacional, aunque cabe destacar que las provincias de Cuenca y Azogues son las únicas provincias que han tenido, a lo largo de la historia, menos afectaciones tras un sismo (Rivadeneira et al., 2007).

En la región oriental, se presenta una menor cantidad de sismos y con ello el daño ha sido moderado, pero la actividad sísmica generada por procesos volcánicos ha generado pérdidas económicas a todo el país, por problemas en las zonas petroleras, además que, en esta zona se describe el primer sismo registrado en el Ecuador después de la conquista española (específicamente en el año 1541) (Rivadeneira et al., 2007). En la Figura 10, se muestran los efectos de terremotos en diferentes zonas del Ecuador y en diferentes temporalidades.

### Figura 10

*Daños causados por terremotos en Ecuador*



*Nota.* Según orden alfabético, a) Ibarra (1868), b) Esmeraldas (1906), c) Pelileo (1949), d) Pomasqui (1990), e) y f) Manabí (2016). La figura fue adaptada de: Troya & Troya, 1999; Quizhpe, 2016; Flores A. , 1949; Ruiz, 1990; Diario El Comercio, 2016.

Para la consideración del proyecto de investigación, se toma en cuenta la plataforma marítima ya que (como se explicará en el capítulo siguiente), existe una gran cantidad de eventos sísmicos en esa zona y son importantes para el análisis que se va a realizar, pero no se considera la zona cercana a Galápagos por la falta de información correspondiente a la zona insular del país.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Comparar los resultados de la estimación estadística de sismos en el Ecuador Continental, a mediano plazo según los métodos del Algoritmo M8 y Lógica Difusa, debido a que ésta es de uso más amplio y compatible con los SIG.

### ***Objetivos específicos***

- Recopilar información sobre eventos sísmicos registrados por instituciones oficiales y autores de trabajos relacionados.
- Construir un catálogo sísmico completo, depurado y homogenizado para realizar cálculos posteriores
- Calcular los parámetros iniciales para el algoritmo M8 para su posterior aplicación a través de software estadístico y Sistemas de Información Geográfica (SIG)
- Determinar las reglas de inferencia para la metodología de Lógica Difusa para su posterior procesamiento a través de software SIG
- Comparar los resultados obtenidos con el Algoritmo M8 y Lógica Difusa

### **Metas**

- Un catálogo sísmico a través de las diferentes recopilaciones, tanto de investigaciones previas como de instituciones oficiales de Sismología.
- Un Mapa de las posibles zonas dentro del territorio ecuatoriano que muestra la posible ocurrencia de un sismo de gran magnitud a mediano plazo (5 años) a través del Algoritmo M8.
- Un Mapa de las posibles zonas de ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el territorio ecuatoriano usando Lógica Difusa.
- Una tabla comparativa de resultados entre los 2 métodos

**Hipótesis**

Ho: La estimación de ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud a mediano plazo en el territorio ecuatoriano si puede ser modelado a través del algoritmo M8 o también por Lógica Difusa.

Ha: La estimación de probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud a medio plazo en el territorio ecuatoriano no puede ser modelado a través del algoritmo M8 o la Lógica Difusa, ya que dependen de otras variables.

## Capítulo II

### Marco Teórico

A continuación, se describen las bases teóricas para comprender de mejor manera la metodología a usar posteriormente, se muestran las generalidades sobre la Sismología, se describe brevemente la actividad sísmica ecuatoriana a través de sus fuentes sísmicas y sus regiones fisiográficas, se presentan características sobre el catálogo sísmico con sus respectivas magnitudes, se describe un apartado sobre la predicción sísmica y las metodologías a comparar, Algoritmo M8 y Lógica Difusa.

#### Generalidades de Sismología

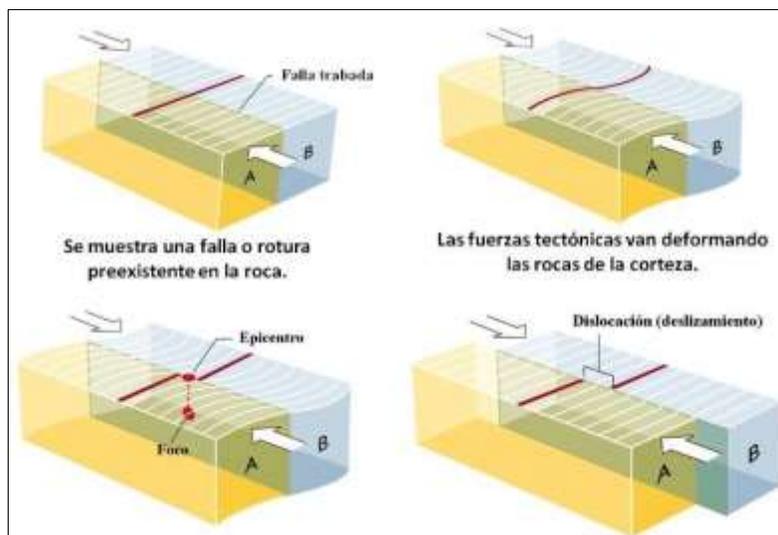
La Sismología es la ciencia que estudia todos los aspectos relacionados con la ocurrencia de eventos sísmicos o cualquier tipo de movimientos en el interior de la tierra con su respectiva distribución espacio-temporal, sus teorías y procesos, todo ello a partir de la observación de fenómenos dinámicos que se generan y, realizar áreas o regiones con características similares (Instituto Geográfico Nacional, s.f.).

Se considera una ciencia no tan antigua ya que, hasta el siglo XVIII, los registros sísmicos eran imprecisos y por ende no se tenía una comprensión más real sobre el fenómeno, pese a ello, en esa época se describían las Leyes de conservación de masa y energía para fundamentar la Teoría de elasticidad, demostrando que la velocidad aumenta con la profundidad y comprueba la relación entre los fenómenos sísmicos con la formación de montañas y el movimiento de placas tectónicas (Vera, 2003).

Como resultado de las investigaciones, para el año 1910 fue publicado el modelo empírico que se usa en la actualidad, conocido como la Teoría de Rebote Elástico con la que se explica de mejor manera la ocurrencia de sismos y la liberación de la energía en el mismo; en la Figura 11, se puede visualizar la forma en que esta teoría funciona (Vera, 2003; Universidad de la Coruña, s.f).

## Figura 11

Proceso que describe la Teoría de Rebote Elástico



*Nota.* Tomado de Astorga (2012).

A través de los años han existido varios enfoques para desarrollar estudios e investigaciones sismológicas, actualmente se clasifican en 2 grandes categorías, la primera trata sobre la propagación de ondas y estructura de la tierra con sus diferentes capas (manto, núcleo y corteza), zonas de subducción, las propiedades de los materiales, entre otros; mientras que la segunda categoría se enfoca en la fuente sísmica y sus fenómenos asociados, tales como tipificación y localización de fuentes sísmicas, energía liberada tras un sismo, geometría, área y desplazamiento de fallas geológicas y estudios de predicción de eventos sísmicos (Vera, 2003).

### **Sismo, Terremoto y Temblor**

Cuando se trata de hacer especificaciones sobre la magnitud o el daño que ha ocurrido sobre un evento, se ha tratado de brindar una cierta explicación acerca los términos Sismo, Terremoto y Temblor, por lo que se deben realizar ciertas puntualizaciones sobre estos.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (s.f.), un terremoto es el evento que ocurre cuando 2 bloques de tierra se deslizan de manera súbita, uno sobre otro a través de una falla o plano de falla, cuyo origen se denomina hipocentro y la ubicación sobre la superficie de la tierra se llama epicentro. En la Figura 12, se ejemplifica los términos mencionados anteriormente para una mejor abstracción de ellos.

Para la Universidad de Mendoza (2002), un sismo es una perturbación o fractura súbita que ocurre en el interior de la tierra y que origina vibraciones o movimientos del suelo que son sentidos en la superficie por la transmisión de una serie de ondas sísmicas. En la Figura 12, se observa los elementos que se describen en la definición de sismo.

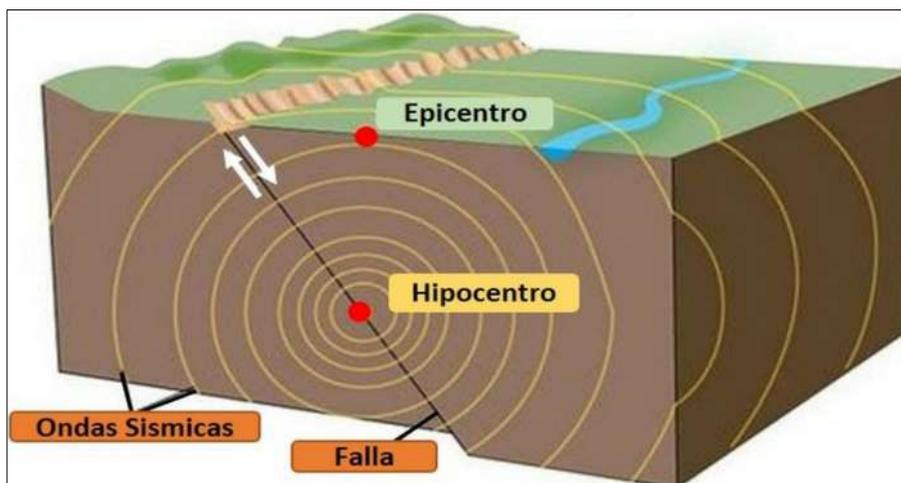
Ambas definiciones guardan concordancia y similitud por lo que, ambos términos se consideran estrictos sinónimos, salvo que se quisiese marcar una diferencia según su etimología, ya que, terremoto proviene del latín terra (que significa tierra) y moto (que significa movimiento); sismo proviene del griego σεισμός que significa temblor, mostrando así la única diferencia marcada entre ambos términos (Organización Chile Cubica, s.f.).

Pese a que se muestre que los términos anteriores se refieren al mismo fenómeno y sea aceptado de tal manera a nivel mundial, en países hispanohablantes y, en específico, Sudamérica, se ha empezado a mostrar ligeras variaciones que han desencadenado que los términos sísmicos anteriormente mencionados sean clasificados según la intensidad y el daño que han causado tales movimientos del suelo; estas diferencias, según información publicada por reportes periodísticos de Cuba (2020) y el portal Tele13 (2019), fueron promovidas por empresas aseguradoras para realizar diferentes tipos de seguros, por ello el término temblor se especificó como un movimiento de muy baja intensidad, casi imperceptible y su daño es nulo (aunque hay

que resaltar que ese término también se considera como sinónimo de Sismo y Terremoto).

### Figura 12

*Elementos que interviene en un terremoto o sismo*



*Nota.* Tomado de Universidad Nacional de Costa Rica (s.f.)

Cuando se trata de cualquier tipo de movimientos, pero sin mayores afectaciones a construcciones o pérdidas humanas, el término adecuado es sismo, por lo que cualquier temblor es un sismo, un terremoto es un sismo y ambos de manera viceversa; según la intensidad, se denomina terremoto a grandes eventos que generen un daño considerable para infraestructuras y vidas humanas, según Cube (2020) se describe como terremoto a los sismos de magnitud 6,5 en escala de Richter, Tele13 (2019) entre magnitud de 6 a 7 en escala de Richter y Todo Noticias (2017) 7,5 grados en escala de Richter.

Si los términos se visualizan desde un enfoque de la psiquis de las personas, se puede concluir que el término Temblor es menos alarmante, mientras que, al hablar sobre Terremotos, la gente se siente más amenazada y por lo tanto genera mayor interés y preocupación. Todas estas acepciones fueron adoptadas por diferentes centros de información sismológica, como se puede visualizar en la Figura 13, en la que

el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) muestra una infografía que muestra las diferencias en los términos.

**Figura 13**

*Infografías presentadas por diferentes instituciones*



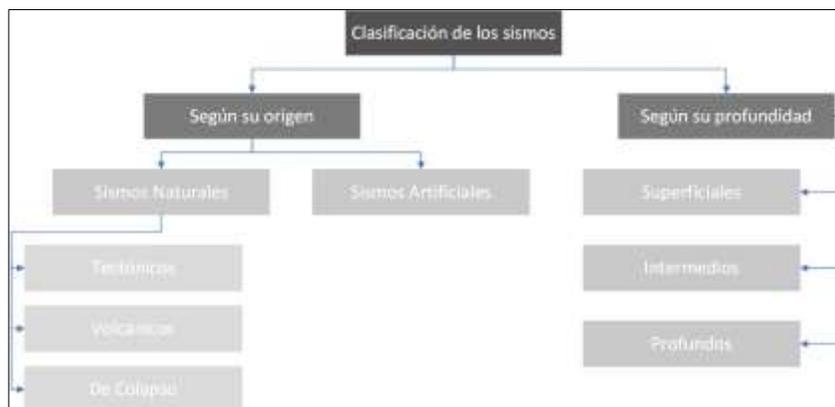
*Nota.* Adaptado de Instituto Geofísico-EPN (2018), Red Cubana de Ciencia (2013), Secretaría de Finanzas Públicas, Estado de Hidalgo (2017) y Portal NTN24 (2016).

### **Clasificación de los sismos**

Si se considera que todos los eventos sísmicos se caracterizan por procesos de ruptura y deformación del material litosférico, todos los sismos son iguales y no cabría una clasificación, pero, si se consideran factores tales como el origen y la profundidad, se ha podido realizar una clasificación que apoya a una mejor concepción del fenómeno. Cabe detallar que, según cada región que se trate, su clasificación puede ser más extensa o tener mayores subdivisiones. En la Figura 14, se muestra de manera resumida, la clasificación que se tratará posteriormente.

**Figura 14**

*Clasificación de los sismos según su origen y profundidad*



**Sismos según su origen.** Según su origen, Gutiérrez et al. (2014) describe que los sismos pueden generar mayor o menor energía y causar mayores o menores efectos en la superficie terrestres, con lo anterior dicho, los sismos se pueden clasificar en Naturales y Artificiales.

**Sismos Naturales.** Se subclasifican en 3 clases, Tectónicos, Volcánicos y de Colapso. Los sismos tectónicos se caracterizan porque se originan por la interacción de placas tectónicas y pueden ser de tipo Interplaca (generado en las zonas de contacto de placas tectónicas) o Intraplaca (ocurre en la zona interna de una placa), un caso particular del último mencionado es el denominado Intraplaca local que se forman por la deformación de material terrestre por la concentración de fuerzas en un lugar específico; un caso especial son los llamados Maremotos, que se identifican como sismos tectónicos cuyo epicentro es el fondo oceánico (Magnani, Blanpied, DeShon, & Hornbach, 2017).

Los sismos Volcánicos se encuentran ligados a erupciones volcánicas, específicamente en los provocan la fractura de rocas debido al magma, pese a que puedan existir muchos registros de este tipo de sismos, generalmente, su magnitud es mucho menor que los sismos tectónicos. Por último, los sismos de Colapso ocurren muy

cerca de la superficie terrestre, en un área reducida y de poca magnitud, se encuentran ligados a derrumbes de cavernas o minas (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

**Sismos Artificiales.** Son los que se producen por acciones antrópicas con fines de exploración y explotación de recursos naturales o investigativos, principalmente asociadas a explosiones comunes y atómicas, estas últimas suelen ser lo suficientemente grandes que son detectadas en algunas partes del mundo (Gutiérrez et al., 2014).

**Sismos según su profundidad.** Esta clasificación toma en cuenta la distancia que existe entre el foco de liberación de energía y la superficie terrestre, según describe Chandwani (2013) y Bonelly & Carrasco (1957) pueden ser Superficiales (Someros o Normales), cuya distancia no va más allá de 60-70 Km, por su cercanía a la superficie son los más destructivos y los más frecuentes; los sismos que se ubican entre los 70 y 300 Km de profundidad se los denomina Intermedios y son menos comunes.

Los sismos que ocurren a más de 300 Km, llegando a estar fuera de los límites de la capa litosférica, se denominan Profundos o Batisismos, son casi imperceptibles por su lejanía con la superficie y poco frecuentes, salvo casos atípicos como lo fue el sismo suscitado en 1954, en la falla de Motril (España), que pese a ser Profundo fue sentido en el Norte de África y en la mayor parte del país europeo. A manera de resumen, se presenta la Tabla 1, con las características principales de la clasificación de los sismos según su profundidad.

**Tabla 1**

*Características de los sismos según su profundidad*

<b>Tipo</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Daño</b>
Superficiales	<60-70 Km	Muy frecuentes	Muy destructivo
Intermedios	70<300 Km	Poco frecuentes	Poco destructivo
Profundos	>300 km	Muy poco frecuentes	Muy poco destructivos (salvo ciertos datos atípicos)

*Nota.* Información tomada de Estrada (2012).

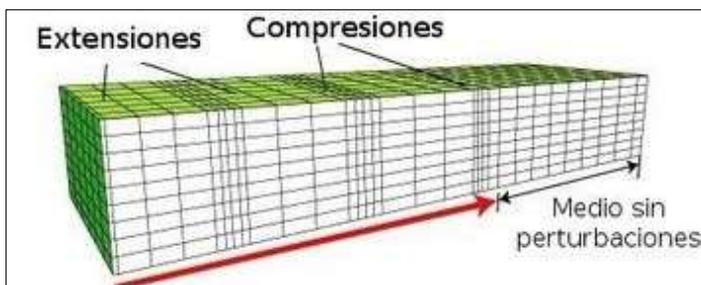
## **Ondas sísmicas**

En la ocurrencia de un sismo, se produce la propagación de la energía liberada, desde su hipocentro a través de ondas, llamadas en Sismología como Ondas sísmicas y se clasifican en 2 grupos, internas (de cuerpo o volumétricas) y superficiales (Delanoy, 2010).

**Ondas sísmicas Internas, de Cuerpo o Volumétricas.** Estas ondas se propagan en la zonas internas o profundas del suelo y son las más rápidas, en comparación a las Ondas Superficiales; son de 2 tipos, las más rápidas son las Ondas llamadas Primarias o conocidas como Ondas P, cuya velocidad puede oscilar entre los 1100 y 8000 m/s (dependiendo del tipo de roca), tienen una dirección longitudinal, comprimiendo y expandiendo la roca sin cambiar su forma, es capaz de propagarse por medios líquidos (magma y océanos), siendo percibida hasta en la atmósfera donde ciertas especies y seres humanos la perciben por un sonido muy grave y profundo (Srdanovic, Aristizabal, Fulla, & Florez, 2012; Gutiérrez et al., 2014). En la Figura 15, se muestra de manera gráfica la definición de Onda Primaria.

### **Figura 15**

*Vista gráfica de la Onda Primaria (P)*



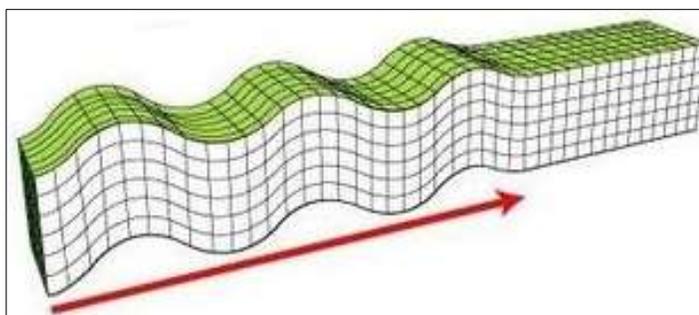
*Nota.* Tomado de Farías (2017).

La segunda onda, denominada Onda Secundaria o S alcanza velocidades entre 500 y 4400 m/s, con una dirección transversal puede deformar el material lateralmente sin cambios de volumen y no pueden transmitirse en medios líquidos; cuando se

produce un sismo, la primera onda que es detectada por los instrumentos de medición es la Onda P que produce un efecto de retumbo que puede hacer vibraciones en ventanas y paredes, segundos después se detecta la Onda S con movimientos verticales u horizontales que sacuden la superficie y es la responsable del daño a edificaciones (Srdanovic, Aristizabal, Fulla, & Florez, 2012). En la Figura 16, se ejemplifica lo enunciado sobre la Onda Secundaria.

### Figura 16

*Vista gráfica de la Onda Secundaria (S)*



*Nota.* Tomado de Farías (2017)

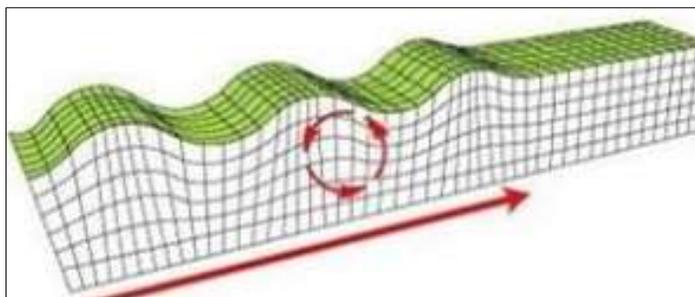
**Ondas sísmicas Superficiales.** Estas ondas se caracterizan porque su mayor propagación y apreciación ocurren en la parte más superficial de la corteza terrestre, por lo tanto, mientras aumente la profundidad su amplitud disminuye y con ello su velocidad es menor que las Ondas Internas (en específico, de la Onda S); existen 2 tipos de Ondas Superficiales, denominadas Rayleigh y Love, nombradas de esa manera en honor a los investigadores que explicaron su formación en 1887 y 1911, respectivamente (Gutiérrez et al., 2014; Herráiz, 1997).

Las Ondas Rayleigh son un producto de la incidencia de las ondas sobre una superficie libre de esfuerzos, como es el caso de la superficie terrestre, generando movimientos verticales y paralelos a la dirección del movimiento, describiendo una forma elíptica y retrógrada o llamado vaivén (similares a las olas), tales movimientos ocasionan severos daños en estructuras sobre la superficie terrestre, además de

tuberías enterradas (especialmente en conducciones subterráneas de petróleo) (Delanoy, 2010; Giner & Molina, 2001). La Figura 17 muestra la forma del movimiento de las Ondas Rayleigh.

### Figura 17

*Vista gráfica de la Onda Rayleigh*

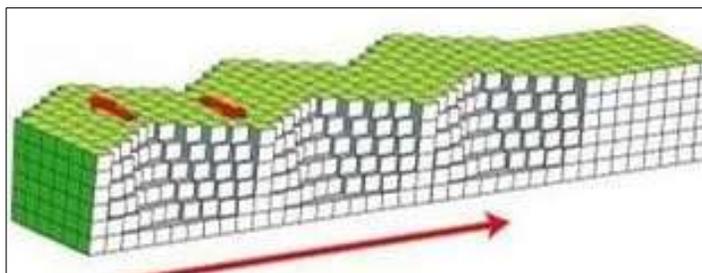


*Nota.* Tomado de Farías (2017)

Las Ondas Love son producidas por fenómenos de transmisión a través de la litósfera, alcanzando una mayor velocidad que las Ondas Rayleigh, describiendo un movimiento perpendicular a la dirección de propagación, por lo que genera una deformación en las rocas similar a la Onda S, aunque solo en dirección horizontal, que producen problemas en los cimientos de las estructuras y evitando su propagación en medios líquidos (Gutiérrez et al., 2014). En la Figura 18, se ejemplifica la forma de movimiento de la Onda Love.

### Figura 18

*Vista gráfica de la Onda Love*



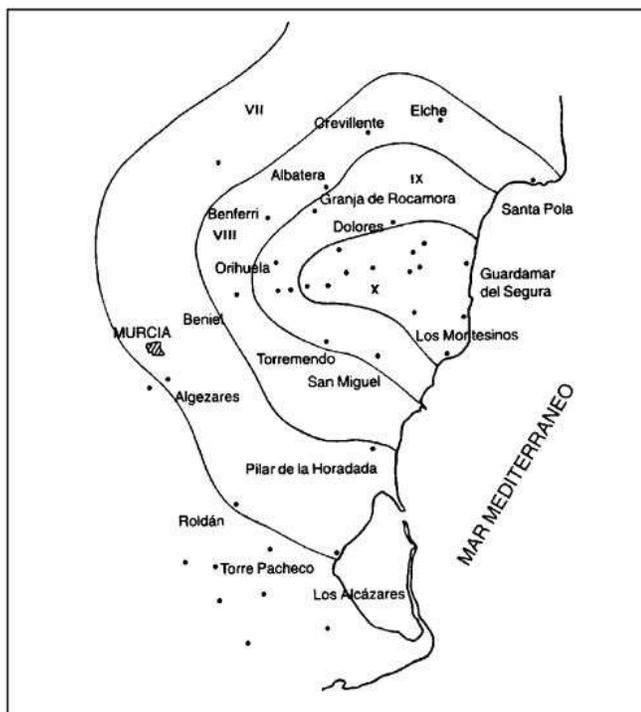
*Nota.* Tomado de Farías (2017)

### **Parámetros físicos para la caracterización de terremotos o sismos**

**Localización espacial y temporal.** La ubicación exacta de un sismo y la especificación de su hipocentro correspondiente han sido un pilar fundamental para estudios de Sismología, en un principio, se lo realizaba de forma gráfica a través de mapas de isoistas, en donde se trazaban áreas con la extensión del sismo y el daño causado, todo ello tomando como base un mapa de isolíneas, como se puede observar en la **Figura 19** (Giner & Molina, 2001).

#### **Figura 19**

*Isoistas del terremoto de Torrevieja, España. 1829*



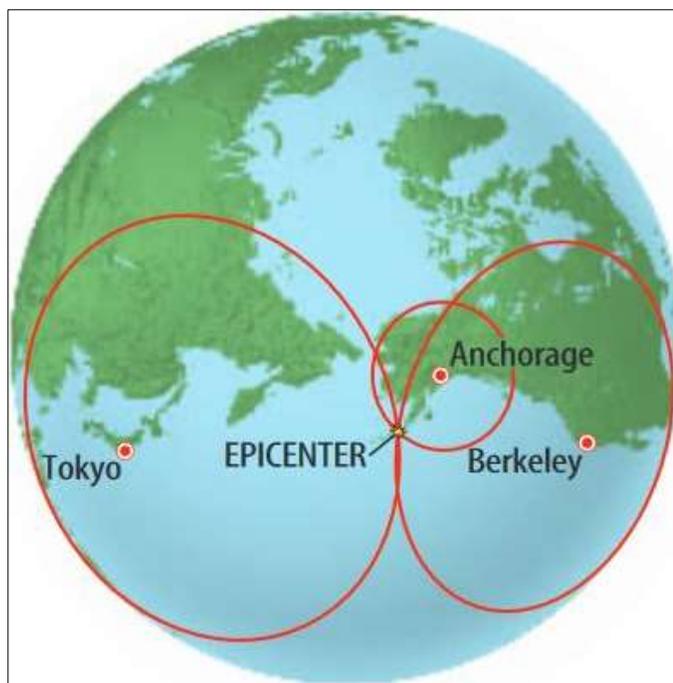
*Nota.* Recuperado de Giner & Molina (2001)

Con el pasar de los años, los instrumentos de medición para ondas sísmicas fueron modernizándose y en el siglo XX ya se obtenían registros en papel (llamados sismogramas), con ello se generaron métodos gráficos para los epicentros de los sismos, que consistían en dibujar círculos con el registro de al menos 3 estaciones sísmicas que hayan captado las ondas generadas por el terremoto con sus respectivos

intervalos de tiempo y, la intersección formada por los círculos generados determinan la ubicación del epicentro (Molina, Giner, & Jáuregui, 2004), como se puede observar en la Figura 20.

### Figura 20

*Método gráfico para la ubicación del epicentro*



*Nota.* Recuperado de Glencoe Science (2001).

Para la localización del hipocentro del sismo, se usaron diferentes métodos numéricos desde el siglo XX, los cuales tuvieron auge con el desarrollo de ordenadores, ya que los cálculos necesarios eran realizados en un menor tiempo. En la actualidad y, a través de equipos con mayor precisión (sismógrafos, acelerógrafos, entre otros), se usa principalmente la resolución de ecuaciones complejas que suman los diferentes tiempos de llegada de las ondas sísmicas P y S usando, principalmente, el ajuste de mínimos cuadrados y algoritmos que facilitan la captura de información y una respuesta eficaz frente a la ocurrencia de un evento sísmico (Giner & Molina, 2001).

Cabe destacar que, la eficiencia y precisión que se desee para la ubicación témporo-espacial de un sismo, dependerán del número y distribución la red de instrumentos de medición (llamada red sísmica), además que, la localización de los eventos sísmicos son la base para estudios sobre las fallas activas de una zona y con ello apoyar a la estimación de la peligrosidad sísmica.

**Tamaño del evento sísmico.** Esta característica depende de 2 parámetros, los cuales (en ciertos casos y de manera equívoca son usados como sinónimos), son determinados por características cualitativas y cuantitativas, que son la Intensidad y la Magnitud, respectivamente (se considera ese orden, por orden de aparición en la historia de la Sismología).

La Intensidad de un sismo es un término determinado de forma cualitativa, que define y califica la fuerza con la que se experimenta el efecto causado por un terremoto en una zona determinada, en función a los daños causados a infraestructuras y a la afectación al paisaje; como se describió anteriormente, los mapas de isoistas eran la forma de obtener información acerca de un evento sísmico, por lo que, la Intensidad fue una de las primeras características que surgieron, antes de los instrumentos de medición que se conocen en la actualidad (Estrada, 2012).

Este parámetro se representa a través de una escala con números romanos y cada uno de ellos muestra el daño que generan (denominados grados); a lo largo de la historia, se han generado una gran cantidad de escalas, las primeras se remontan a finales del siglo XVIII, pero una de las fundamentales para la Sismología fue planteada en 1883 por S. de Rossi y F. Forell, la cual constaba 10 grados y la que fue tomada como base por Mercalli para que en 1902, presente su escala con 12 grados basándose en el daño producido a las construcciones y en la percepción de las personas y cuya trascendencia llega hasta la actualidad (Musson & Cecić, 2011).

Hoy en día, existe una variedad de escalas de intensidad desarrolladas a través de diferentes parámetros y estudios, entre las más importantes o de uso común a nivel mundial se menciona la Escala Modificada de Mercalli (MM o MMI), la cual toma como base la presentada en 1902 y modificada por Wood y Newman en 1931 y Richter en 1956 (es mayor difundida en América), la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), la cual ha sufrido varios cambios desde su primera edición que se denominó Escala MSK y es usada principalmente en Europa; existen escalas que son usadas en regiones específicas, como la realizada por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), que consta de 7 grados de intensidad (Herráiz, 1997; Musson & Cecić, 2011). Las diferentes escalas mencionadas con anterioridad se muestran en la Figura 21.

Por otro lado, la Magnitud de un sismo es un parámetro netamente instrumental que no varía con la ubicación espacial de observación (no es subjetivo, a diferencia de la Intensidad) que relaciona la energía liberada en el evento sísmico y la amplitud de las ondas sísmicas generadas por el mismo, gracias a este atributo, se puede medir el tamaño de un terremoto de manera universal y mejorar la precisión de dicha medición a través de diferentes sismógrafos o equipos complementarios (Molina, Giner, & Jáuregui, 2004; Espíndola & Pérez, 2018).

Este parámetro se representa a través de una escala abierta (a diferencia de la Intensidad que muestra un número finito de grados) numérica positiva, aunque Gutiérrez et al. (2014) y en concordancia a diferentes investigaciones científicas publicadas, destacan que existiría un límite extremo superior marcado por la resistencia que muestran las rocas de la Litósfera; originalmente, la primera escala de magnitud fue desarrollada por Charles Richter en 1935 la cual se basa en la diferencia entre los logaritmos decimales (base 10) de la máxima amplitud y su respectiva corrección de distancia, esta última es deducida empíricamente, tomando el nombre de Escala de Richter (Herráiz, 1997).

**Figura 21***Equivalencias entre diferentes escalas de Intensidad*

Rossi-Fonel	Escala Modificada de Mercalli (MM o MMI)	Agencia Meteorológica de Japón (JMA)	Escala MSK
I	I	I	I
	II		II
	III		III
II			
III	III		
IV			
V	IV	II	IV
VI	V	III	V
	VI	IV	VI
VII			
VIII	VII	V	VII
	VIII		VIII
IX	IX	VI	IX
X	X		X
	XI		XI
	XII	VII	XII

*Nota.* Recuperado de Giner & Molina (2001)

En la actualidad, la Escala de Richter es de uso común por las instituciones sismológicas y a nivel general, a la hora de mostrar el tamaño de un sismo, pero los avances tecnológicos, las diferentes metodologías para el cálculo y las variadas formas en que las ondas sísmicas son captadas por la instrumentación específica, han llevado a generar diferentes tipos de Escalas de Magnitud, es por ello que, cuando se informa sobre la ocurrencia de eventos sísmicos, diferentes entidades pueden mostrar ciertas

variaciones en el número mostrado, por ejemplo, en un inicio se mostraba la magnitud proveniente principalmente de la onda P, llamada  $M_b$  y, actualmente se usa la magnitud de momento o  $M_w$ , por su mayor veracidad, como se mostrará posteriormente en el apartado correspondiente a Catálogo Sísmico. A manera de ejemplificar una equivalencia de la energía liberada por un sismo y la Escala de Richter, en la Figura 22, se presenta dicha relación con cantidad de dinamita.

### Figura 22

*Relación entre la Escala Richter y carga de dinamita TNT*

Magnitud Richter	Ejemplo	Equivalencia de la energía TNT
-1,5	Rotura de una roca en una mesa de laboratorio	1g
0,5	Granada de mano	6 lb
1,0	Pequeña explosión en un sitio de construcción	30 lb
1,5	Bomba convencional de la Segunda Guerra Mundial	320 lb
2,0	Bomba convencional de la Segunda Guerra Mundial	1 ton métrica
2,5	Bomba "Blockbuster" de la Segunda Guerra Mundial	4,6 ton métricas
3,0	MOAB-Arma no nuclear	29 ton métricas
3,5	Explosión de una mina	73 ton métricas
4,0	Pequeña bomba atómica	1 kilotón
4,5	Tornado promedio (energía total)	5,1 kilotón
5,0	Bomba atómica de Nagasaki	32 kilotón=32.000 ton
5,5	Little Skull Mtn., NV Quake, 1992	80 kilotón
6,0	Double Spring Flat, NV Quake, 1994	1 megatón
6,5	Northridge quake, 1994	aprox. 5 megatón
7,0	La mayor arma termonuclear	aprox. 50 megatón
7,5	Landers, CA Quake, 1992	aprox. 160 megatón
8,0	Sismo de San Francisco, CA, 1906	aprox. 1 gigatón
8,5	Sismo de Anchorage, Alaska, 1964	aprox. 5 gigatón
9,0	Sismo de Sumatra, diciembre 2004	aprox. 30 gigatón
10,0	Estimado para un meteorito (bóido) de 10 km impactando a una velocidad de 25 km/s	1 teratón

*Nota.* Tomado de Rivadeneira et al. (2007)

### Catálogo sísmico

Es una base de datos que registra los eventos sísmicos que ocurren en una región determinada, la cual es la fuente principal de información para realizar cualquier estudio en Sismología, por tanto, debe contener todos los parámetros que caracterizan un sismo, calculados en las mismas condiciones, a fin de constituirse de una manera homogénea (Parra, 2016; Tavera, Agüero, Fernández, & Rodríguez, 2001). En la Tabla 2 se muestran los principales parámetros que contiene un catálogo sísmico.

**Tabla 2***Principales parámetros registrados en un catálogo sísmico*

Parámetro	Forma de presentación/ Escala de medición	Descripción
Fecha	dd/mm/aa	dd=día mm=mes aa=año
Tiempo de origen	hh/mm/ss	hh=hora mm=minuto ss=segundo en GMT: Hora Universal
Ubicación	$\phi$ , $\lambda$ , p	$\phi$ =latitud $\lambda$ =longitud p=profundidad (Km)
Magnitud	Mw/mb/ML/Ms, entre otras	Mw=Magnitud de Momento mb=Magnitud de ondas de volumen ML=Magnitud Local Ms=Magnitud de ondas superficiales

*Nota.* Recuperado de Flores (2011)

Como se mencionó en apartados anteriores, existen diferentes escalas de magnitud por la variedad de instrumentación sísmica y formas de cálculo de la misma, por lo que un catálogo sísmico puede tener diferentes unidades de magnitud que se describen a continuación.

### ***Magnitud local ( $M_L$ )***

Fue la primera en aparecer y se conoce, de manera literal, como magnitud Richter, la cual se calcula al obtener un valor intermedio entre las amplitudes máxima y mínima registrados por el sismógrafo (Estrada, 2012; Servicio Sismológico Nacional, s.f).

### ***Magnitud de ondas internas, de volumen o cuerpo ( $M_B/M_b$ )***

Esta escala está medida por la amplitud máxima registrada por las ondas internas P y S (se prioriza la onda P) pero tiene una saturación (limitaciones en la observación por el tipo de onda y la respuesta del instrumento, dificultad para determinar un valor en la escala) en magnitudes que oscilan entre 6,5-6,8. (Flores,

2011; Estrada, 2012). Adicionalmente, el subíndice es mayúsculo o minúsculo según el Período de medición, puede ser largo o corto, respectivamente.

### ***Magnitud de ondas superficiales ( $M_s$ )***

Esta escala es usada para eventos sísmicos con foco superficial y se basa en la amplitud máxima registrada por las ondas superficiales (principalmente de las ondas Rayleigh), está enfocada en sismos de mayor magnitud, pero tiene una saturación cuando se obtienen magnitudes mayores de 8,3-8,7 (Flores, 2011; Servicio Sismológico Nacional, s.f).

### ***Magnitud de Momento ( $M_w$ )***

Este tipo de magnitud se basa en el Momento Sísmico  $M_0$  (valor proporcional al área de ruptura relacionado a la geometría de la falla, la profundidad del evento y el desplazamiento máximo ocasionado durante el sismo), su cálculo es más robusto y puede durar entre 15 a 30 min después que ocurra el terremoto, por ende, no tiene saturación y es la escala de mayor uso a nivel mundial (Delanoy, 2010; Estrada, 2012).

### ***Otras magnitudes***

Existen otras magnitudes que son usadas en diferentes investigaciones, por ejemplo, la magnitud de duración ( $M_d$ ) se basa en la duración del registro del sismo, generalmente desde la llegada de la onda P hasta que dicha onda se confunda con el ruido de fondo del sismógrafo, por otro lado, la magnitud de coda ( $M_c$ ) considera el tiempo de la parte tardía de la señal registrada en la ocurrencia del sismo hasta retomar su nivel inicial, antes de ser registrado el evento sísmico, la magnitud de energía ( $M_e$ ) muestra la energía irradiada por el sismos a través de las ondas que emita el mismo, su cálculo se basa en otras magnitudes como  $M_b$ ,  $M_s$  y  $M_w$ , por ello, su uso y aplicación precisas son difíciles (González J. , 2001; Flores, 2011; Servicio Sismológico Nacional, s.f). En la Tabla 3, se muestra, la saturación que tiene las escalas descritas previamente.

**Tabla 3***Saturación de las diferentes magnitudes*

<b>Tipo de magnitud</b>	<b>Saturación (Grados)</b>
Local	~ 6,8
Ondas internas, de volumen o cuerpo	~ 7-8
Ondas superficiales	~ 8,3
Momento	Ninguna
Duración, Coda	No aplica
Energía	Ninguna

*Nota.* Cada grado de saturación mostrado corresponde a su magnitud correspondiente. Recuperado de Flores (2011).

***Procedimientos necesarios para la homogenización de un catálogo sísmico***

En primera instancia, un catálogo sísmico se encuentra de forma heterogénea por diferentes causas, entre las principales, González (2018) destaca las diferentes magnitudes en las que se puede registrar los eventos sísmicos, las imprecisiones causadas por los diferentes instrumentos de medición o cálculo y (según el tipo de investigación que se lleve a cabo) el número de terremotos que se requiera, por ello, se requieren de 3 procesos los cuales llevarán a que un catálogo sísmico muestre información relevante para el propósito deseado.

Los procesos a los que someten los datos que contiene un catálogo sísmico corresponden a homogenización (obtener una escala común de magnitudes), completitud (referente a una correcta tasa de sismicidad) y depuración (eliminación de réplicas y premonitores del conjunto de datos)

En la Figura 23, a manera de ejemplo, se muestra el proceso de confección del catálogo sísmico realizado para el Ecuador continental por Parra (2016).

Figura 23

*Procedimiento para la realización de un Catálogo Sísmico*



*Nota.* Recuperado de Parra (2016).

### **Predicción sísmica o estimación de ocurrencia de sismos**

Se define como el proceso por el cual se busca indicar las condiciones en las que un sismo podría ocurrir en una determinada región, y con ello tomar decisiones adecuadas para frenar el daño potencial de dicho terremoto en la población y en las infraestructuras que podrían verse afectadas (Cárdenas, 2007).

Como se mencionó anteriormente, la predicción de ocurrencia de eventos sísmicos aún es un reto importante en el mundo entero, autores como Mogi (1985) e instituciones como la Red sísmica de Puerto Rico (s.f.) y USGS, (s.f.) han optado por usar el término pronóstico en sus investigaciones, específicamente en predicciones que tengan una un tiempo de predicción mayor a 10 años, pese a que en bibliografía y proyectos internacionales aún se considere como predicción a la mencionada anteriormente y, se hayan mostrado resultados alentadores tales como Toulkeridis et al. (2019), a manera de ejemplo.

### **Precursores sísmicos**

Son variaciones o cambios abruptos en diferentes parámetros de observaciones de la naturaleza, medidos en un área determinada, que suceden antes de un evento

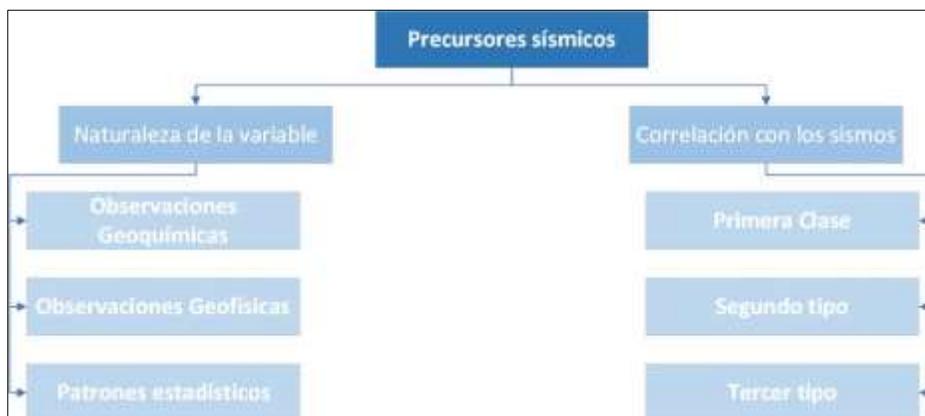
sísmico como consecuencia de la acumulación de energía en el interior de la tierra (Flores, 2011).

La Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI) en el año de 1994 reconoció como precursores sísmicos únicamente a 5 variables de las 40 presentadas, referentes a variaciones químicas de agua subterránea, deformación de la corteza y cambios en el nivel de aguas subterráneas, patrones de sismicidad, enjambres de terremotos y silencios sísmicos (zonas donde la ocurrencia de sismos era frecuente y no han sucedido en un período determinado de tiempo) (Uyeda, Nagao, & Kamogawa, 2011). A partir de las variables descritas anteriormente, han surgido nuevas propuestas y nuevas observaciones, que se perfilan como precursores sísmicos, aunque cabe resaltar que, hasta la fecha, no se ha comprobado la veracidad completa de dichos precursores (Ouzounov, Pulinets, Hattori, & Taylor, 2018).

**Clasificación de los precursores sísmicos.** Los precursores sísmicos pueden ser clasificación según la naturaleza de la variable y su forma de correlación con los eventos sísmicos, en la Figura 24 se muestran dichas clasificaciones.

#### Figura 24

*Clasificación de precursores sísmicos*



*Nota.* Adaptación realizada de: Tapia-Hernández, Reddy, & Oros, 2017; Flores, 2011

***Precursores según la naturaleza de la variable.*** En esta clasificación se encuentran las observaciones geoquímicas las cuales muestran cambios en los elementos químicos unos días antes que ocurra un sismo cuya medición enfocada como posible precursor data del año 1927, pero sus primeras apariciones en documentos científicos publicados datan del año 1966 en el área de Tashkent (Rusia), donde se determinó una correlación entre la ocurrencia de un sismo y el elemento Radón, convirtiéndose en el gas más estudiado como precursor de eventos sísmicos, cuya medición se realiza a través de rayos  $\alpha$  (Alfa) y/o rayos  $\gamma$  (Gamma) (Tapia-Hernández, 2013; Riggio & Santulin, 2015).

La hipótesis que se maneja se basa en el modelo de dilatancia que, según Scholz, Sykes, & Aggarwal (1973), las grietas presentadas antes de un evento sísmico aumentan la difusión de fluidos a través del suelo y junto a los cambios en resistencia, causan variaciones físico-químicas en las rocas, en otras palabras, la compresión cercana a una falla geológica activa produce emisiones de Radón a manera que el suelo fuese exprimido y, con ello genera una mayor emisión del gas que puede anticipar un evento sísmico (Tapia-Hernández, 2013).

Otros gases que han sido objeto de estudio son: Helio (en proporción Helio-Argón) probado en la región oeste de Japón y mostrando variaciones tanto en fumarolas de gas como en fuentes minerales que se ubicaban entre 9 a 95 km del epicentro sísmico, Hidrógeno y Carbono, este último ligado a variaciones en la composición química a lo largo de fallas geológicas de parte del territorio japonés (Ouzounov, Pulinets, Hattori, & Taylor, 2018; Tapia-Hernández, Reddy, & Oros, 2017; Nagamine & Sugisaki, 1991).

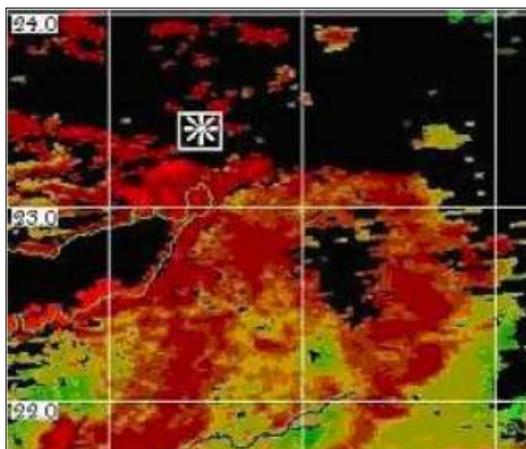
Por otro lado, las observaciones geofísicas provienen (como su nombre lo indica) del medio físico o espacial de la región a evaluar y han mostrado cierta correlación con la ocurrencia de eventos sísmicos, entre las que se pueden mencionar:

la reflexión y refracción de ondas mecánicas, campos electromagnéticos, efectos lumínicos, perturbaciones ionosféricas (especialmente en la zona F de la Ionósfera), presión barométrica, dirección de movimiento de las placas tectónicas (medido por datos de estaciones GPS), entre otros (Tapia-Hernández, 2013).

Otra variable que se ha considerado es el cambio en la Topografía terrestre, esto gracias a la tecnología Radar y los satélites InSAR, ya que se tiene la hipótesis que las fricciones entre los diferentes movimientos de las rocas pueden generar variaciones infrarrojas que son visibles a través de las imágenes radar; por otro lado, se han hecho estudios acerca de anomalías térmicas superficiales, donde se han encontrado diferencias de hasta 9°C registrados antes de un evento sísmico, ambos supuestos, como se ha dicho anteriormente, no han podido ser concluyentes por la falta de captura de datos (Cárdenas, 2007). En la Figura 25 se muestra una anomalía térmica capturada en India, unos instantes antes que ocurra un evento sísmico (las zonas de color rojo muestran una variación considerable de la temperatura promedio).

### **Figura 25**

*Anomalía térmica antes de un sismo, India.*



Nota. Recuperado de Cárdenas (2007).

Dentro de esta clasificación también se puede encontrar los patrones sísmicos, los cuales gracias a los registros y su posterior evaluación de carácter estadístico o

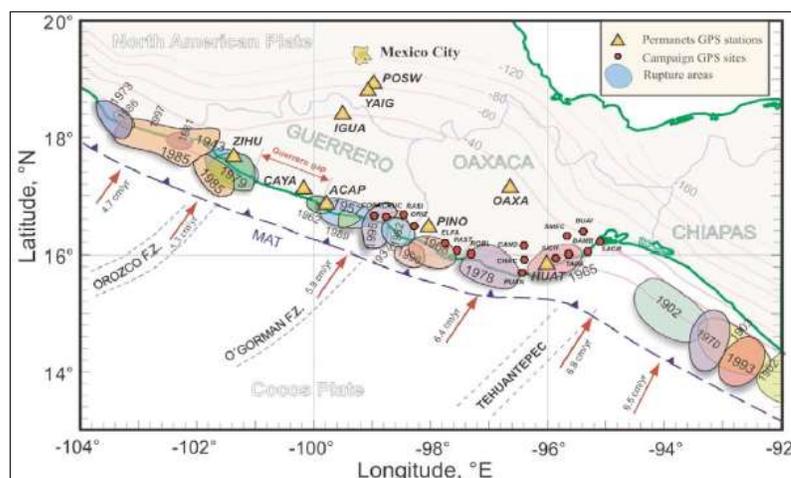
geoestadístico, se ha podido también estimar o predecir eventos sísmicos, los cuales se fundamentan en la ubicación espacial, el tiempo que ocurren las réplicas y las diferentes magnitudes que ocurren y, con tales datos empezar a formar correlaciones a través de diferentes modelaciones (Tapia-Hernández, 2013).

Se han considerado muchos tipos de análisis o tendencias en la estimación de ocurrencia estadística de sismos, todos estos basados en un catálogo sísmico amplio (en algunos casos, se ha complementado la información con datos GPS), dando origen a varias metodologías, tales como: Brechas sísmicas (considera la disminución de la actividad sísmica en una región y tiempo determinados), Patrón de dona (describe el aumento de sismicidad en las periferias de una región geográfica), Algoritmo M8 (estudia el análisis de réplicas a nivel espacio-temporal), Silencio Sísmico, Probabilidad de ocurrencia, entre otros (Tapia-Hernández, Reddy, & Oros, 2017).

En la Figura 26, se puede visualizar la ubicación de zonas de una posible ocurrencia de sismos a través de la metodología de brechas sísmicas en el estado de Guerrero, México.

### **Figura 26**

#### *Identificación de la Brecha sísmica de Guerrero México*



*Nota.* Recuperado de Franco et al. (2005)

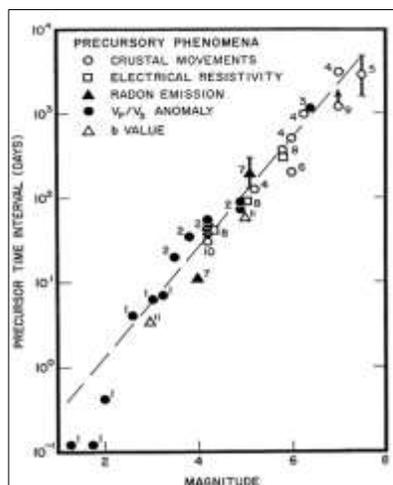
***Precursores según la correlación con los sismos.*** Dentro de esta clasificación se consideran los llamados precursores de Primera clase que se caracterizan porque el tiempo en que pueden anticipar la ocurrencia de un terremoto está directamente relacionado a la magnitud del sismo que pudiese ocurrir, por ende, mientras el sismo principal sea de una mayor magnitud, el precursor generará un mayor tiempo de anticipación, según Scholz, Sykes, & Aggarwal (1973) y Rikitake (1975) atribuyen esa característica a los procesos de dilatación y difusión.

También existen los precursores de Segundo tipo que se caracterizan porque el tiempo en que pueden anticipar un evento sísmico es independiente de la magnitud de su correspondiente terremoto, por lo que se presume que muestran una señal inminente cuando se produce un sismo y se encuentran ligados al desarrollo de microfracturas, que ocurren horas antes que ocurra el terremoto (Flores, 2011).

Por último, se describen los precursores de Tercer tipo los cuales están relacionados a pre-eventos, tensiones y corrientes terrestres, aunque su tiempo de anticipación es relativamente amplio, ya que se estima que tienen un tiempo medio entre 4-5 días, pese a que no exista aún una explicación de carácter físico sobre su aparición, estos precursores tendrían la capacidad de indicar una alta tensión en regiones de la corteza terrestre (Flores, 2011). En la Figura 27, se muestran varios precursores analizados y relacionados con el tiempo de ocurrencia de un sismo.

## Figura 27

*Relación entre precursores, su tiempo y la magnitud sísmica*



*Nota.* Adaptado de Scholz (2019).

### **Métodos de predicción sísmica**

Para que una metodología se considere como la idónea para una predicción sísmica u estimación de ocurrencia de eventos sísmicos, debe contener: tiempo de ocurrencia del evento (intervalo temporal en el que podría ocurrir), el sitio de la ocurrencia (o su respectiva ventana espacial), la magnitud del sismo pronosticado o estimado (o su respectiva ventana de magnitudes), definición o justificación científica del método empleado cuyo resultado debe ser escrito y presentado en formatos accesibles para la comunidad científica para su verificación y aplicación en otras regiones y la definición de la incertidumbre o referencia al error esperado de la predicción o estimación (Tapia-Hernández, 2013; Kanamori, 2003; Tapia-Hernández, Reddy, & Oros, 2017).

Las investigaciones acerca de la predicción de terremotos, según lo describe Flores (2011), se pueden clasificar en 2 grandes grupos, los métodos estadísticos o probabilísticos y los métodos geofísicos o determinísticos.

Los métodos geofísicos o determinísticos se relacionan con la identificación, búsqueda, recopilación y vigilancia de cambios de carácter físico en la tierra y que guarden relación para que se identifiquen como precursores sísmicos, en la actualidad, pese a que en bibliografía aún se encuentre el término Geofísico, este engloba a los parámetros Geoquímicos, los cuales concuerdan con la manera de calcularlos y estimarlos como posibles precursores de terremotos (Flores, 2011).

En la actualidad, los métodos Geofísicos se están enfocando específicamente en variaciones en uno o varios parámetros que antecedan a la ocurrencia de terremotos gran magnitud, los cuales puedan generar grandes pérdidas en infraestructura y amenacen con la vida de las personas.

Los métodos estadísticos o probabilísticos se basan en registros históricos o instrumentales sobre la sismicidad de una región cuya calidad de predicción depende de la cantidad de información que se pueda obtener, por lo que resulta a veces insuficiente por los altos períodos de retorno de grandes terremotos (tiempo en que un evento sísmico pueda volver a ocurrir bajo iguales o similares circunstancias) (Flores, 2011).

Actualmente, se busca completar la información de los análisis estadísticos a través de la Arqueología, llegando a usar la Paleosismología, por otro lado, también se está mejorando los resultados obtenidos a través de la fusión con modelos geofísicos.

### ***Temporalidad de la predicción***

Se refiere al intervalo de tiempo en el que, la predicción o estimación estaría vigente en función al sismo a predecir, esto depende de la calidad de datos iniciales o variables a considerar y, el modelo o tipo de observación de la variable tomada en cuenta.

**Predicciones o estimaciones a corto plazo.** Representa el nivel de estimación idóneo y al que muchos investigadores quisieran alcanzar ya que considera un intervalo de tiempo entre la alerta y la ocurrencia del evento sísmico de días o semanas; pese a todos los esfuerzos realizados, hasta el día de hoy este tipo de predicciones o estimaciones son las más complejas e inestables por la aleatoriedad de la sismicidad según la zona a estudiar, aunque en años recientes se están realizando mayores investigaciones a través de diferentes programas japoneses, estadounidenses y rusos (como sobresalientes) (Flores, 2011; Kanamori, 2003).

**Predicciones o estimaciones a mediano plazo.** Estas estimaciones tienen lugar luego de unos meses o pocos años después de determinar la posible ocurrencia del sismo, las cuales son las más estudiadas por su flexibilidad temporal y ya que entre los años 1985-2008 estuvo muy familiarizada a muchos planes de prevención y mitigación a nivel mundial (Flores, 2011; Kanamori, 2003).

**Predicciones o estimaciones a largo plazo.** Este tipo de predicciones o estimaciones se caracterizan por largos periodos de tiempo (10 años o más) entre la estimación del evento sísmico y la ocurrencia del mismo, los investigadores han desistido de su investigación en años recientes ya que, las nuevas tecnologías prometen mejores soluciones y reducción en los tiempos de predicción o estimación (siempre teniendo en cuenta que no existe una metodología exacta como tal) (Flores, 2011; Kanamori, 2003). En la Tabla 4, se muestra las diferentes temporalidades de predicción junto a las acciones emergentes que se pueden tomar para mitigar el daño del posible terremoto.

**Tabla 4***Predicciones con sus posibles medidas de mitigación*

<b>Tipo de predicción</b>	<b>Tiempo para alarma</b>	<b>Posibilidad de obtención</b>	<b>Medidas de mitigación</b>
Inmediata (Alerta temprana)	0s-20s	Buena	Sistema de Alarmas, Cierre de válvulas y corte de servicios básicos (luz eléctrica)
Corto plazo	Horas a semanas	Desconocida	Inicio de planes de respuesta a emergencias para ubicarse en lugares seguros
Mediano plazo	Meses a pocos años	Aceptable	Reforzar estructuras y líneas de servicios Mejoras en los sistemas de emergencias Reforzar o aumentar la instrumentación sísmica
Largo plazo	10 años o más	Buena (para fallas de alta tasa de actividad)	Realizar estimaciones de amenazas y riesgos Realizar obras que mitiguen pérdidas (sismorresistentes)

*Nota.* Adaptado de Sykes, Shaw, & Scholz (1999)

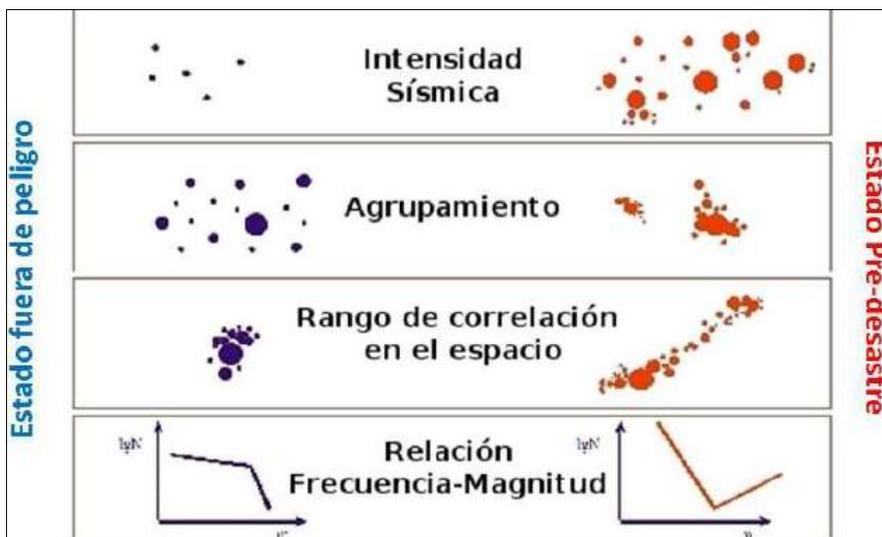
### **Algoritmo M8**

Es un método de predicción o estimación de grandes terremotos de plazo intermedio, diseñado por Keilis-Borok & Kossobokov en 1986 y publicando resultados de predicción en 1990, quienes evaluaron, en primera instancia, la actividad sísmica predecesora a terremotos con magnitud mayor a 8 Mw a nivel mundial y cuyo objetivo fue identificar patrones sísmicos antes de la ocurrencia de los mismos (Keilis-Borok & Kossobokov, 1986; Keilis-Borok & Kossobokov, 1990; Flores, 2011).

Este algoritmo se basa en la identificación de Patrones Sísmicos Premonitores (PSP), que son análisis de la sismicidad de un área específica considerando intervalos, espacial, temporal y de magnitud para encontrar relaciones entre los eventos sísmicos de magnitud moderada con la ocurrencia de terremotos de gran magnitud, con ello se busca determinar similitud con otros patrones y determinar una posible ocurrencia de un sismo de gran magnitud (Flores, 2011; Keilis-Borok, Shebalin, & Zaliapin, 2002). En la Figura 28 se muestra a breves rasgos como actúan los patrones sísmicos predecesores previos al eventual terremoto.

**Figura 28**

*PSP observados antes de un gran terremoto*



*Nota.* Recuperado de Flores (2011)

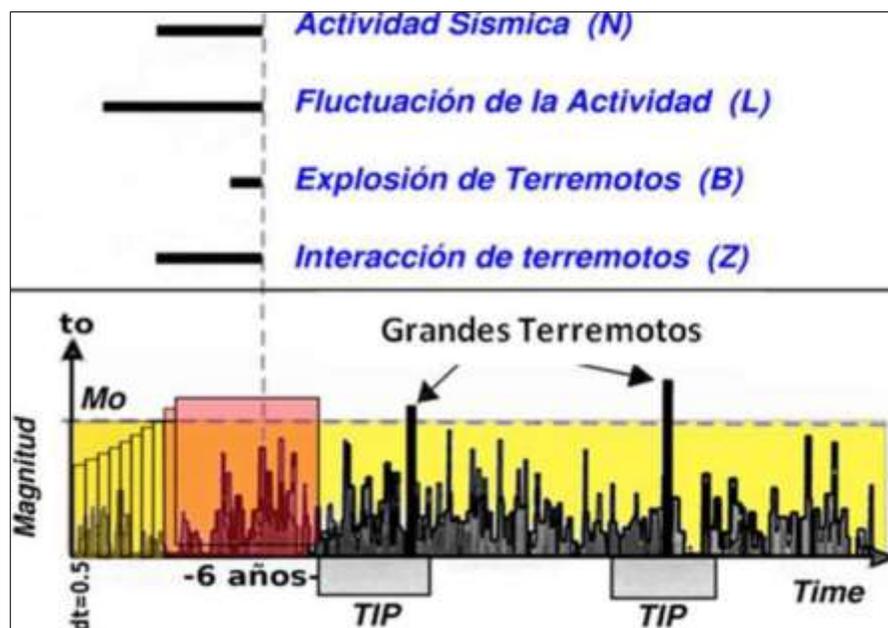
El Algoritmo M8 utiliza los patrones sísmicos (que en la metodología pasan a ser funciones) que se refieren al incremento en la actividad sísmica, su agrupamiento en el tiempo y en el espacio, aumento en la variación de sismicidad, forma de interacción a gran escala de los eventos sísmicos (réplicas), todo ello a través de área delimitadas, los cuales determinan Tiempos de Incremento de Probabilidad (TIP) y deben ser calculados según la zona de estudio, la ubicación espacial y recurrencia de los eventos sísmicos (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Flores, 2011).

La hipótesis que se maneja para este algoritmo radica en que antes del colapso en un sistema no lineal, le precede un estado de transición crítica que provoca variaciones en las propiedades dinámicas del sistema, con lo que se busca encontrar el grado de inestabilidad de dicho sistema, comparándolo con los eventos sísmicos, el sistema no lineal representaría las fallas activas, los grandes terremotos son las transiciones críticas, los sismos de menor magnitud son las perturbaciones al sistema y el grado de inestabilidad es el pronóstico buscado (Ismail-Zdeh & Kossobokov, 2011;

Keilis-Borok & Kossobokov, 1990b). En la Figura 29 se muestra el esquema del funcionamiento del algoritmo M8.

**Figura 29**

*Esquema básico del Algoritmo M8*



Nota. Tomado de Flores (2011)

### ***Determinación del área de investigación***

El algoritmo M8, considera que la zona de investigación sea cubierta por áreas superpuestas, generalmente círculos, cuyo diámetro o radio dependen de la magnitud del evento sísmico que se busca predecir, según Keilis-Borok & Kossobokov (1990a) y Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov (2014) las fórmulas para determinar dichas áreas se muestran en las ecuaciones (1) y (2). Cabe considerar que se han tomado en cuenta en otras investigaciones, rectángulos o círculos formados por meridianos y paralelos.

$$\text{Diámetro} = \exp(M_0 - 5,6) + 1 \text{ [Grados de meridiano terrestre]} \quad (1)$$

$$\text{Radio} = (\exp(M_0 - 5,6) + 1) * \frac{111}{2} \text{ [Kilómetros]} \quad (2)$$

## **Funciones**

El algoritmo M8 usa 7 funciones, las cuales determinarán la presencia o no de un TIP, cabe destacar que las 3 primeras funciones presentadas a continuación son calculadas en 2 instancias diferentes, por ello la consideración de 7 funciones.

**Función N o Flujo de la actividad sísmica.** Se relaciona con la actividad sísmica y el flujo de eventos sísmicos ocurridos en un intervalo de tiempo (ventana de tiempo), el cual es considerado por parámetros establecidos por el algoritmo, que va desde  $t_i - s$  hasta  $t_i$  (donde  $t_i$  es el tiempo de origen y  $s$  es el intervalo de análisis igual a 6 años), por lo que esta función depende netamente del número de sismos determinados en el intervalo descrito anteriormente y cuya magnitud es mayor que el límite mínimo o  $M_{min}$  (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Flores, 2011). La ecuación (3) muestra la forma de calcular dicha función.

$$N(M_{min}, t_i, s) = n(t_i) - n(t_i - s) \quad (3)$$

**Función L o Desviación de la Actividad a largo plazo.** Corresponde a la desviación o fluctuación de la actividad sísmica promedio, equivalente a la diferencia existente entre el número de terremotos de 2 intervalos de tiempo, el primero que va desde  $t_i - s$  a  $t_i$  y el otro que consta desde  $t_0$  hasta  $t_i - s$ , donde  $t_0$  es el tiempo inicial del catálogo sísmico tomado para el estudio respectivo (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov, 2014). En otras palabras, compara la tasa de sismicidad entre un intervalo de tiempo y la tasa de sismicidad del intervalo temporal anterior. En las ecuaciones (4) y (5) se describen el cálculo de esta función.

$$L(M_{min}, t_i, s, t_0) = N - N' \quad (4)$$

$$N' = n(t_0, t_i - s) * \frac{s}{(t_i - s) - t_0} \quad (5)$$

**Función Z, Concentración o Interacción de los Terremotos.** Esta función se basa en la concentración espacial y a gran escala de los eventos sísmicos y equivale aproximadamente a la relación entre la longitud promedio de las fuentes y la distancia media entre ellas, por ello, esta función depende de la cantidad de sismos registrados con su respectiva energía liberada en el intervalo témporo-espacial correspondiente (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov, 2014). En la ecuación (6) se muestra el cálculo de esta función.

$$Z(t, Mmin, Mmax, s, \alpha, \beta) = \frac{S(t, Mmin, Mmax, s, \alpha, \beta)}{[N(t, Mmin, s) - N(t, Mmin, s)]^{2/3}} \quad (6)$$

**Función B, Concentración o Interacción de los Terremotos.** Describe la cómo se agrupan los eventos sísmicos posteriores al terremoto principal y está representado por la máxima cantidad de réplicas ocurridas en los e días siguientes a cada terremoto en un rango determinado de magnitud, desde Mmin hasta Mmax (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov, 2014; Flores, 2011). En la ecuación (7) se describe el cálculo de la función mencionada anteriormente.

$$B(t, Mmin, Mmax, 1 \text{ año}) = B_i(e)max \quad (7)$$

El algoritmo también establece una relación tendencial entre los valores obtenidos entre las funciones y su correspondiente significación con respecto a la sismicidad evaluada, cuyos símbolos se muestran en la *Tabla 5*.

**Tabla 5**

*Simbología para la relación entre sismicidad y Funciones*

Símbolo	Significado
N+	Aumento de eventos sísmicos
N-	Disminución de eventos sísmicos
L+	Aumento de sismicidad promedio
L-	Disminución de sismicidad promedio

Símbolo	Significado
Z-	Si los eventos presentan magnitudes similares, indica una disminución en dichos eventos
Z-	Si la tasa de sismicidad permanece constante, indica una disminución en la magnitud de los eventos

*Nota.* Adaptado de Flores (2011)

### ***Parámetros, normalización de la actividad sísmica y declaración de Tiempos de Incremento de probabilidad (TIP)***

En las funciones del algoritmo, se mostraron algunos parámetros los cuales intervienen en el cálculo de la predicción, por ejemplo, la ventana de tiempo es de 6 años, pero existen otros tales como  $M_{max}$ , cuyo ajuste varía según la función a determinar ya que, para las funciones N y L se realiza a  $M_0$ , mientras que, para la función Z se usa como  $M_{max} = M_0 - 0,5$ , pero en B se utiliza  $M_{max} = M_0 - 0,2$ ,  $M_{min} = M_0 - 2$  y  $e=2$  días (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Ismail-Zdeh & Kossobokov, 2011).

Teniendo en cuenta que la actividad sísmica va a ser muy heterogénea, el algoritmo M8 propone una normalización a través de una magnitud mínima ( $M_{min}$ ), por lo que, la tasa media anual de los sismos principales que cumple con  $M_i \geq M_{min}$ , será igual a un valor común entre ellos (Flores, 2011). Como se mencionó en apartados anteriores las funciones N, L, y Z son calculadas 2 veces, a base constantes iguales a 10 y 20 (valores obtenidos por los cortes de magnitud) obteniendo así las series  $N_1$ ,  $L_1$ ,  $Z_1$  y  $N_2$ ,  $L_2$ ,  $Z_2$ , respectivamente (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990a; Ismail-Zdeh & Kossobokov, 2011; Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov, 2014).

Con todas las funciones calculadas, se procede a determinar la declaración de un TIP, el cual se muestra cuando 6 de las 7 funciones muestran cambios significativos en relación a sus valores promedio, específicamente se habla de un aumento del 10% para las funciones N, L, Z y del 25% para la función B, cuyo análisis temporal se lo realiza cada 6 meses, en el intervalo de tiempo correspondiente, además, la duración

de declaración de TIP es de 5 años (tiempo en el que puede ocurrir el evento sísmico de gran magnitud) (Keilis-Borok & Kossobokov, 1986; Ismail-Zdeh & Kossobokov, 2011; Flores, 2011).

### **Lógica Difusa**

Conocida también como Lógica Fuzzy (Borrosa) o en términos anglosajones Fuzzy Logic, es un conjunto de principios matemáticos que se basa en la Teoría de conjuntos difusos, que no cumplen con los principios de contradicción y exclusión, el cual posibilita imitar el comportamiento de la lógica humana y con ello, permite modelar problemáticas de tipo no lineal (Andocilla, 2012; Zadeh, 1965; Cabrera, 2013).

Esta metodología permite la representación de incertidumbres matemáticas a través de herramientas con mayor formalidad que permitan su adecuado tratamiento, ya que pueden trabajar con información imprecisa y cualitativa, a más de tipo cuantitativa generando productos que usan el razonamiento aproximado y que son flexibles para su campo de aplicación correspondiente (Zafirir et al., 2018; Cabrera, 2013)

La lógica difusa usa enunciados que no son del todo ciertos o falsos, por lo que se aplican valores de veracidad de un conjunto que se forma por 2 extremos, la verdad o falsedad absolutas, con ello se muestra que un elemento del conjunto difuso presenta una característica llamada grado de pertenencia o membresía (en inglés degree of membership) el cual es definido a través de funciones y toma valores entre cero (No pertenencia) y uno (Pertenencia definida), los demás valores que se encuentran en ese rango indican en qué grado pertenecen al conjunto difuso (Salcedo, Padilla, Morales, & Toulkeridis, 2018; Feizizadeh, Shadman, Jankowski, & Blaschke, 2014).

### ***Definición matemática***

Si un conjunto difuso (A) que pertenece al conjunto Universo (X), se encuentra definido por su función de pertenencia ( $\mu_A$ ) de tal manera que  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ ,  $\mu_A(x)$  corresponde al valor de pertenencia de x en el conjunto A (Zadeh, 1965). Si dicho

conjunto universo es finito tal que  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , entonces un conjunto difuso A quedaría definido por la ecuación (8). Por otro lado, si el conjunto universo es infinito, tal que  $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ , el conjunto difuso A quedaría definido por la ecuación (9)

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (8)$$

En donde  $\frac{\mu_A(x_i)}{x_i}$  es el valor de pertenencia al conjunto difuso A para cada  $x_i$ .

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (9)$$

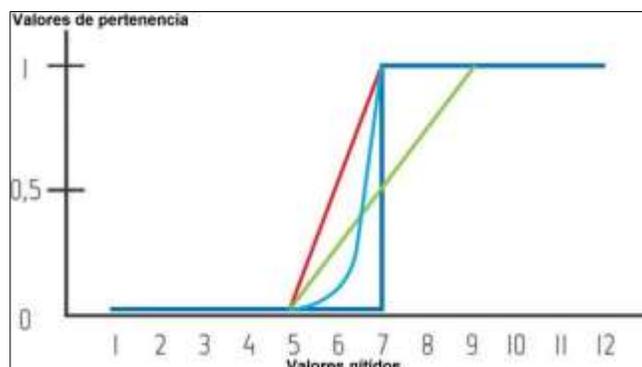
### ***Funciones de pertenencia o membresía***

Como se ha mencionado anteriormente, una función de pertenencia o membresía proporciona el grado de similitud de un elemento al conjunto difuso que corresponda, cuya forma depende del criterio a usar para la resolución de la problemática, el punto de vista del investigador o indicadores de tipo social o geográfico (Wolfgang, 2010)

Para que una función se considere como de pertenencia o membresía debe ser una función real cuyos valores oscilen entre cero y uno, donde el valor de uno refleje la pertenencia definitiva al conjunto difuso, el valor de 0,5 (punto de cruce) coincida con el punto medio del conjunto de datos a evaluar (llamado conjunto nítido) y muestre una cadencia a la hora de moverse hacia los límites de la función (Pérez, 2005; Wolfgang, 2010; Zafrir et al., 2018). En la Figura 30 se muestran ejemplos de funciones de pertenencia o membresía.

**Figura 30**

*Ejemplos de funciones de pertenencia o membresía*



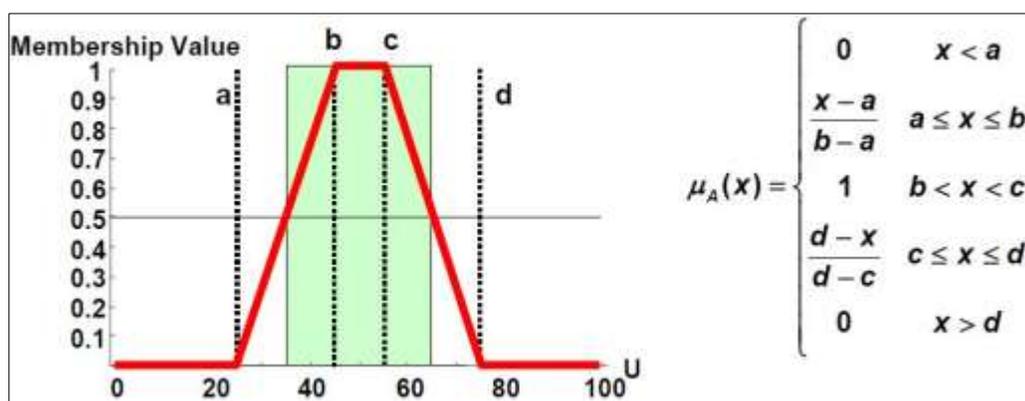
*Nota.* Adaptado de Cabrera (2013)

### ***Clasificación de las funciones de pertenencia o membresía***

Según lo descrito por Wolfgang (2010) que, al basarse en lo expuesto en un principio por Zadeh (1965), se logra realizar una clasificación que consta de 2 tipos, las funciones lineales y sinusoidales, además, la forma que puede tomar la función puede ser determinada a través de 4 parámetros. Las funciones lineales pueden tomar forma de S, L, trapezoidal o triangular, mientras que las funciones sinusoidales describen formas de campana, S y L. En las Figura 31 y Figura 32 se muestran dichas funciones con sus respectivos parámetros.

**Figura 31**

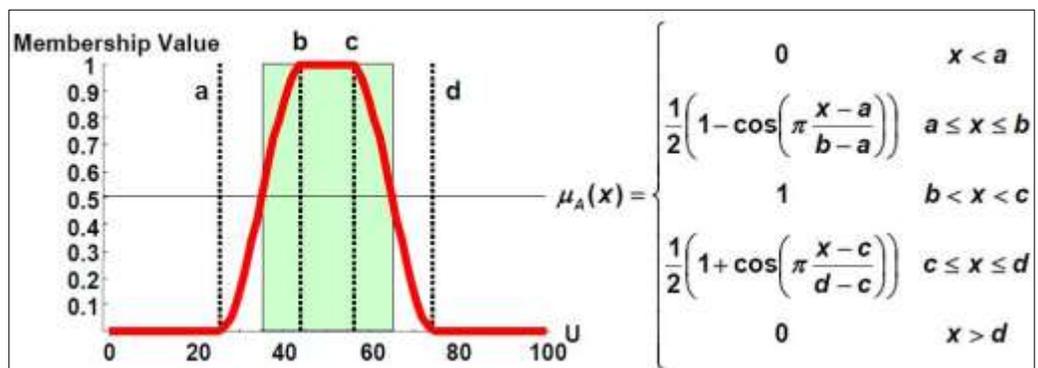
*Función de pertenencia lineal*



*Nota.* Tomado de Wolfgang (2010)

**Figura 32**

*Función de pertenencia sinusoidal*

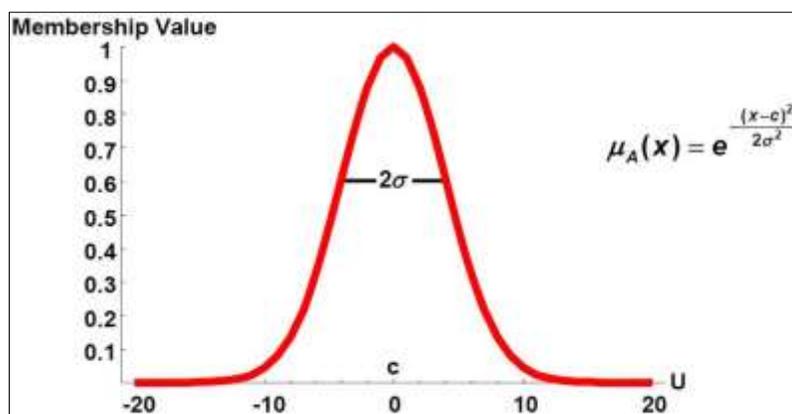


*Nota.* Tomado de Wolfgang (2010)

Cabe destacar un caso especial de la función de membresía en forma de campana, el cual corresponde a la función Gaussiana que, pese a que provenga de la Teoría de probabilidades y use parámetros diferentes a los mostrados anteriormente (media y desviación estándar), puede ser usado como función de pertenencia (Wolfgang, 2010). En la Figura 33 se muestra la gráfica de dicha función con sus parámetros respectivos.

**Figura 33**

*Función de pertenencia Gaussiana*



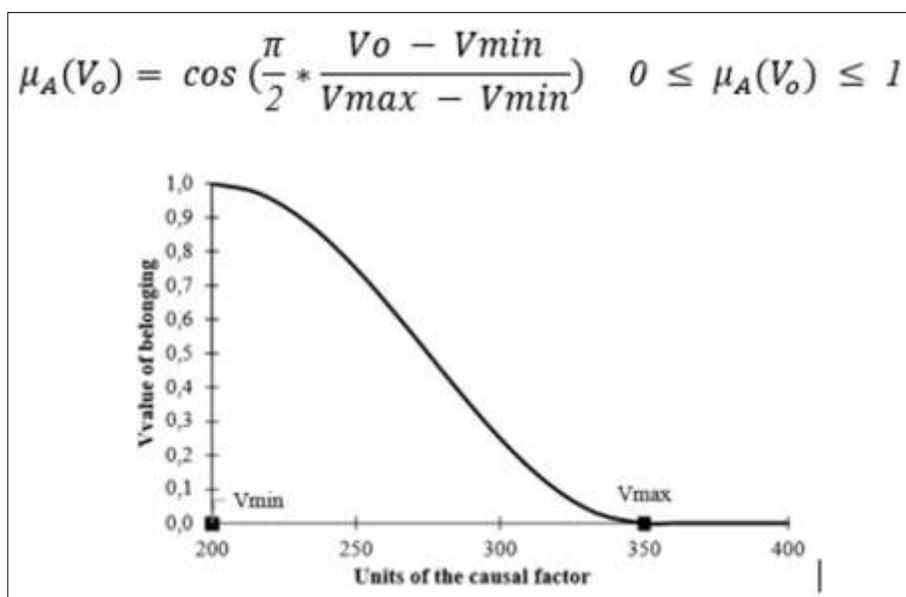
*Nota.* Recuperado de Wolfgang (2010)

Gracias a diferentes investigaciones, como Padilla (2007), Andocilla (2012), Zafrir et al. (2018) y Salcedo, Padilla, Morales, & Toulkeridis (2018), se han mostrado casos exitosos de modelación de variables geoespaciales a través de la Lógica Difusa y, en específico, en el uso de funciones de pertenencia sinusoidales, dichas investigaciones determinaron 3 casos que muestran viabilidad para los cálculos respectivos.

El primer caso utiliza la curva senoidal cuadrada, cuyo rango oscila entre cero y  $\pi$ , el segundo caso usa la función coseno con valores que van desde cero a  $\pi/2$  y es usada cuando el valor de pertenencia es inversamente proporcional al evento analizado (ver Figura 34) y el tercer caso, que usa la función seno en el mismo rango del caso anterior, es usado en relaciones directamente proporcionales (ver Figura 35) (Zafrir et al., 2018; Salcedo, Padilla, Morales, & Toulkeridis, 2018; Jaramillo, Cruz, Padilla, & Toulkeridis, 2018).

### Figura 34

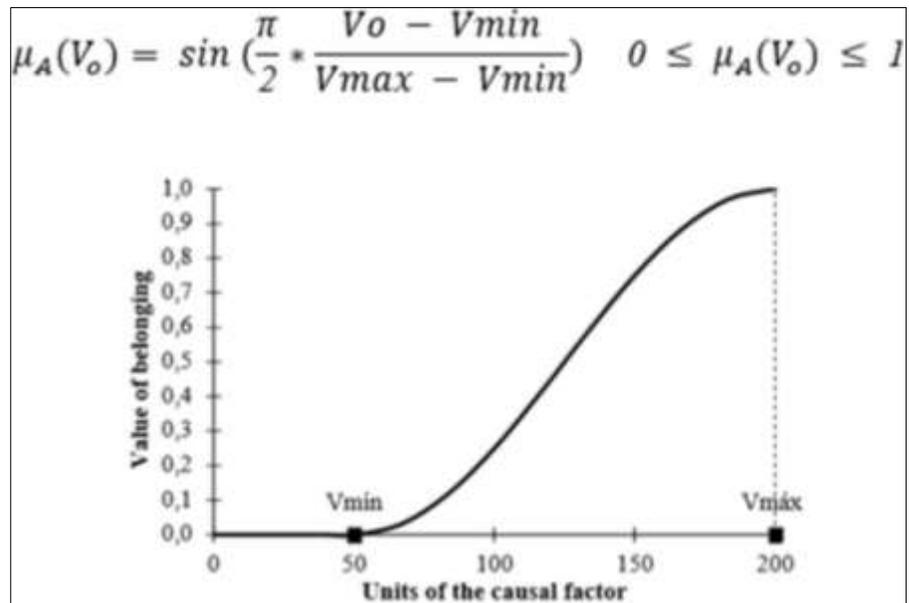
*Segundo caso de funciones sinusoidales*



*Nota.* Tomado de Zafrir et al. (2018)

**Figura 35**

Tercer caso de funciones sinusoidales



Nota. Tomado de Zafir et al. (2018)

## **Capítulo III**

### **Metodología**

En este apartado se muestran los procedimientos y cálculos efectuados para llevar a cabo el proyecto correspondiente, describiendo a detalle, la forma de obtener cada una de las metodologías a comparar, considerando iniciar por la obtención de un catálogo sísmico depurado el cual se convertirá en la base de este estudio, y finalizando con la comparación entre ellas, con sus respectivos subproductos cartográficos.

#### **Descripción general de la metodología**

Dado que la presente investigación se ha basado en la comparación y evaluación de 2 procesos metodológicos distintos, en el Anexo 1 se muestra el procedimiento que se ha seguido para el desarrollo completo del proyecto y, posteriormente se ha detallado la forma de alcanzar los resultados mostrados, según corresponda.

#### **Elaboración del catálogo sísmico**

##### ***Recopilación de la información***

Los datos que se han recopilado corresponden a registros sísmicos que han ocurrido en el territorio ecuatoriano y sus cercanías con corte al mes de julio del año 2020, por lo que, se ha realizado la búsqueda en diferentes agencias o entidades especializadas en Sismología y que provean de dicha información; se han considerado 3 fuentes principales, con sus respectivos catálogos sísmicos: Instituto Geofísico-EPN (Ecuador), National Earthquake Information Center (NEIC, USA) y el International Seismological Centre (ISC, Reino Unido).

Adicionalmente, se ha considerado la información mostrada por la alianza entre la fundación Global Earthquake Model (GEM) y el ISC, pero dicho catálogo se compone, principalmente de los datos obtenidas por esta última por lo que, desde un comienzo, existiría duplicidad entre ambos catálogos, por lo que, fue descartado para su uso.

Los registros sísmicos mostrados por el IG-EPN son presentados en diferentes archivos con varias extensiones y divididos por su temporalidad, pero destaca que es el único que muestra un catálogo de tipo histórico desde el año 1587 hasta 1976, otro muestra un catálogo sísmico depurado y homologado a magnitud Mw entre los años 1900-2009, a partir del año 2010 la información se encuentra en diferentes magnitudes y sin depuración. Además, otra característica a señalar es que, todos los catálogos disponibles poseen diferentes campos, en diferentes idiomas (español e inglés) y no poseen una cadencia o concordancia entre ellos.

El portal del ISC, en comparación a las instituciones consultadas en este proyecto, muestra 2 tipos de información para su descarga que se diferencian por su revisión periódica de los datos sísmicos obtenidos, cuyos nombres son el ISC Bulletin (datos sin revisión) y el Reviewed ISC Bulletin (datos revisados automática y mensualmente), además, muestran varios tipos de magnitudes para el mismo evento sísmico, ya que realizan recopilaciones de diferentes instituciones a nivel mundial. Otra característica a destacar es que, todos los catálogos poseen los mismos campos, por lo que su fusión es más fácil a la hora de realizar análisis o geoprocesos.

La información que provee el NEIC, institución que pertenece al Servicio Geológico estadounidense (conocido como USGS), muestra información sísmica desde el año 1900 hasta julio del año 2020, registrada con diferentes magnitudes y mostrando una interfaz gráfica más amigable a la hora de realizar consultar sobre eventos sísmicos, además que su información es más amplia en los errores de cada una de las mediciones o cálculos mostrados. La información adicional de las fuentes consideradas se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6***Evaluación de las fuentes de información sísmica*

<b>Institución (Tipo)</b>	<b>Fecha de inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Número de eventos</b>	<b>Magnitud mínima</b>	<b>Magnitud máxima</b>
IG-EPN	1901/1/7	2020/1/31	13676	3 MLv	8,35 Mw
IG-EPN (Histórico)	1587/8/31	1976/11/29	29	5 Mw	7,6 Mw
Reviewed ISC Bulletin	1906/1/31	2018/1/31	15709	0,6 Md	8,2 Ms
ISC Bulletin	2018/1/1	2020/7/25	11925	-0,1 MLv	8 Mw
NEIC (USGS)	1906/1/31	2020/7/25	2091	2,9 ML	8,8 Mw

Posteriormente, los diferentes catálogos sísmicos recopilados pasaron por una conversión de formato para ser estandarizados en tipo shape (\*.shp), con ello, se ha trabajado con el software ArcMap y se ha eliminado registros que tuviesen celdas vacías en la fecha, hora, magnitud o profundidad del sismo, además de suprimir datos anómalos, encontrando valores de -99999 en la profundidad de los eventos sísmicos, por ejemplo.

Se ha proseguido con la realización de las fusiones entre los diferentes catálogos para así obtener 3 fuentes principales de información, considerando que se tomó como fuente principal la información presentada por ISC dada su extensión, variedad en magnitudes para el mismo evento sísmico y su homogeneidad en sus campos (prioridad de uso: ISC>IG-EPN>NEIC), por tanto, se ha procedido a fusionar el catálogo de la fuente ISC con el de NEIC, cuyo resultado muestra que el 96,8% de sismos registrados por la segunda fuente constan en el catálogo de ISC, este dato es muy similar al encontrado por Parra (2016) en la confección del catálogo sísmico de dicha investigación.

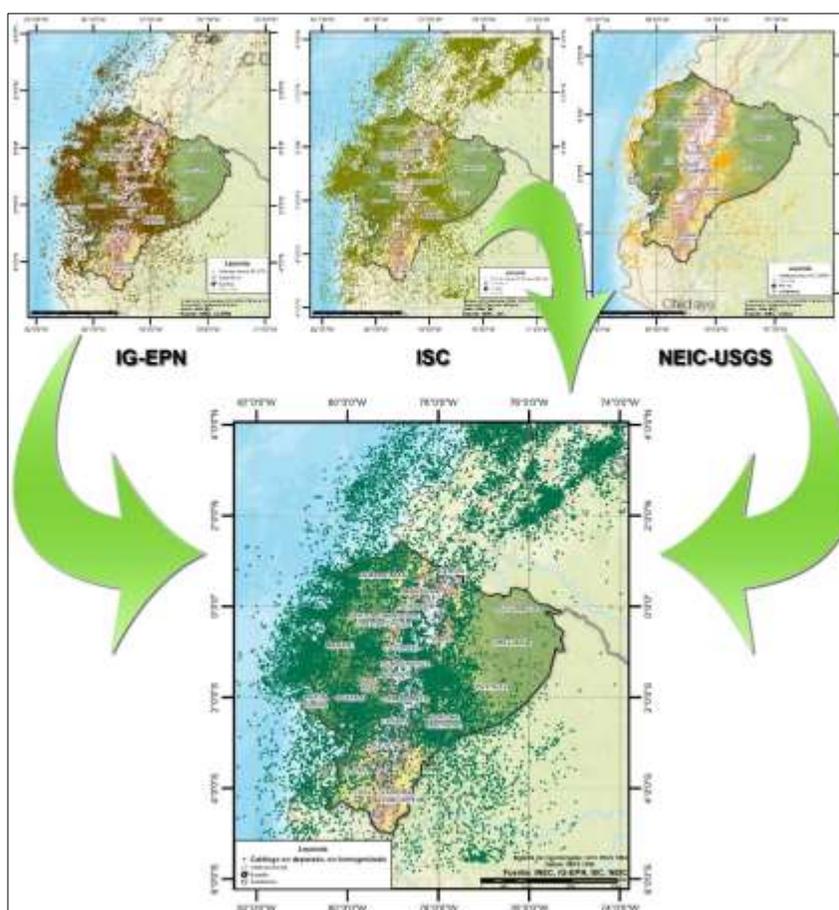
Posterior a esta fusión, se ha considerado una depuración adicional de eventos sísmicos ya que, se ha encontrado duplicidad de datos, pero, a diferencia de la depuración previa, existían variaciones espacialmente con distancias de hasta 5 km, es decir, existían terremotos que coincidían en los campos de fecha, magnitud, profundidad y hora, pero se encontraban en 2 puntos distintos y en una distancia no

mayor a 5 km, este tipo de errores se han asumido que se produjeron por las diferentes fuentes internacionales de información y modelos matemáticos para el registro del mismo evento sísmico.

Por lo que, a través de buffers de 5 km y de manera manual, se han eliminado dichos eventos a lo largo de todo el catálogo fusionado. Con lo descrito anteriormente también se ha realizado en la fusión entre los catálogos de la Fuente 1 con el Subcatálogo obtenido (Ver Figura 37), el cual no está homogenizado ni depurado y consta con un total de 21718 eventos sísmicos. En la Figura 36 se muestran los catálogos de las fuentes usadas y el resultado anteriormente mencionado.

### Figura 36

*Catálogos sísmicos de las fuentes y su resultado previo*



Obtenida la depuración mencionada anteriormente, se ha procedido a realizar una homogenización en los campos del catálogo resultante, empezando por el idioma, ya que muchos de los softwares usados en diferentes procesos subsecuentes se encuentran programados en inglés, además que se tenga un orden para la información. En la Tabla 7 se muestran los campos usados con su descripción correspondiente.

**Tabla 7**

*Campos usados para el catálogo sísmico del proyecto*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Longitude	Coordenada de longitud del evento sísmico
Latitude	Coordenada de latitud del evento sísmico
Year	Año de ocurrencia del sismo
Month	Mes de ocurrencia del sismo
Day	Día de ocurrencia del sismo
Magnitude	Magnitud (en diferentes unidades) del sismo
Depth	Profundidad (en Km) del sismo
Hour	Hora de ocurrencia del sismo
Minute	Minuto de ocurrencia del sismo
Second	Segundo de ocurrencia del sismo

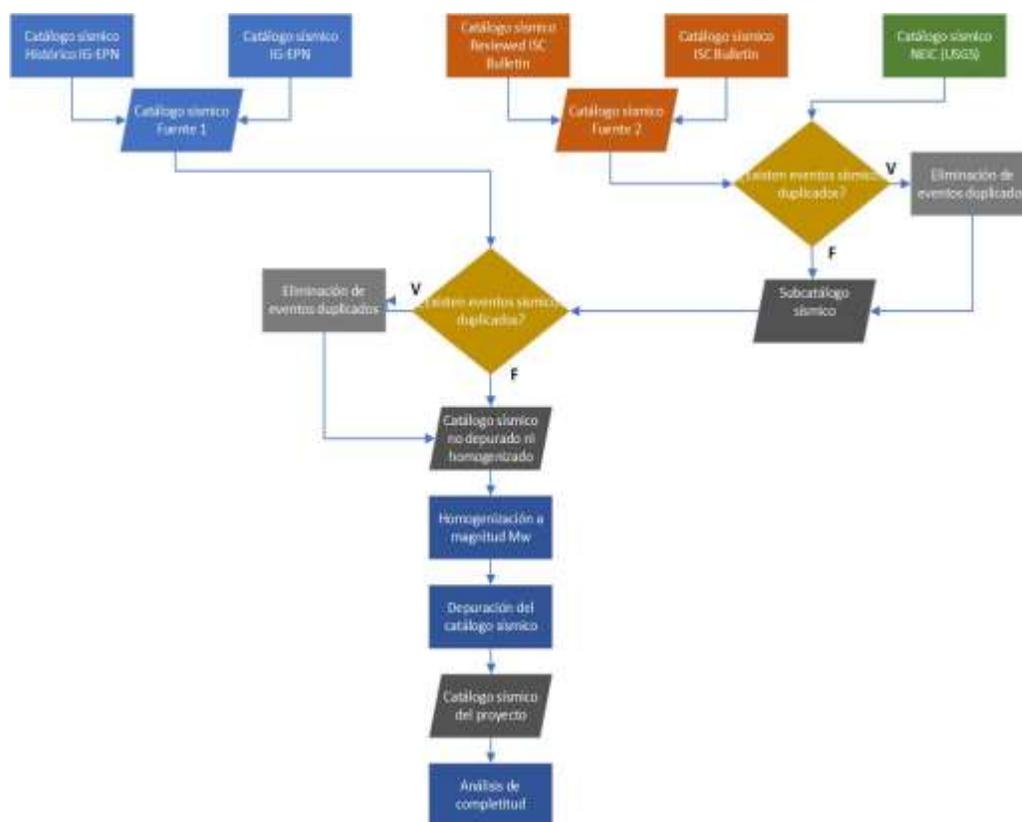
*Nota.* Los campos presentados han sido escritos en minúsculas en el software, para facilidad en los procesos de programación, además, se usó un campo adicional llamado “date” en el que se almacenó en conjunto el año, mes y día de ocurrencia del sismo, a motivos de respaldar los datos a procesar.

A continuación, se han realizado los procesos de depuración (conocido en inglés como declustering), homogenización y completitud en los que se suprimen eventos sísmicos que son considerados como premonitores o réplicas, se muestra una única magnitud para los registros sísmicos y se determina la temporalidad en que el catálogo obtenido se encuentra consistente, respectivamente.

En el primer proceso y para los cálculos que se requieren posteriormente, se han asociado las réplicas encontradas a su evento sísmico principal y, en el segundo se han evaluado las diferentes ecuaciones o convenciones que permitan la unificación de la unidad de magnitud sísmica. En la Figura 37 se muestra el proceso para la confección del catálogo sísmico del presente proyecto.

Figura 37

Esquema utilizado para la confección del catálogo sísmico



### Homogenización del catálogo sísmico

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el proceso de homogenización consiste básicamente en unificar todos los registros sísmicos que se tienen en el catálogo inicial (el cual fue realizado por la recopilación de las diferentes fuentes consultadas según consta en la Figura 37), para los diferentes cálculos y procedimientos, según corresponda en el presente proyecto.

Dada la gran variedad de magnitudes encontradas, se ha procedido a evaluar diferentes formas de homogenizarlas, cuyas consultas bibliográficas han sido enfocadas al territorio ecuatoriano; los parámetros descritos por Engdahl & Villaseñor (2002) y citados por Beauval et al. (2013) y Parra (2016) muestran que los terremotos profundos y reportados con magnitud  $M_s$  equivalen a  $M_w$ ,  $m_B$  y  $m_b$  (según el orden de preferencia).

Las magnitudes estimadas por las fuentes Abe (1981, 1981) (ABE) y por Pachecho y Sykes (1992) (P&S) son consistentes con las estimaciones  $M_w$  de Harvard.

Las magnitudes que fueron reportadas por Gutenberg & Richter (1954) (G&R), Rothé (1969) (ROTHE) y Pasadena (PAS) antes de 1960, son 0,2 unidades mayores a las mostradas por Abe, por lo que, se debe considerar una reducción en 0,2 a las magnitudes que provienen de las fuentes anteriormente mencionadas.

Por otro lado, Utsu (2002) describió que las magnitudes  $m_b$  y  $M_s$  se pueden considerar equivalentes a  $M_w$  para magnitudes mayores a 6,0 en  $m_b$  y 8,0 en  $M_s$ , respectivamente. Adicionalmente, mostró las equivalencias resultantes entre las magnitudes  $m_b$  y  $M_s$ , reportadas por ISC y NEIC (O PDE, Preliminary Determination of Epicenters), con la magnitud  $M_w$ , concluyendo que, en el caso de  $m_b$  se estima una equivalencia hasta una magnitud de 6,5, mientras que para  $M_s$  se considera equivalente a una magnitud de 6,2.

Beauval et al. (2013) mostraron comparaciones entre eventos con magnitudes  $M_b$  y  $m_b$  reportado por ISC, concluyendo equivalencias con  $M_w$  para magnitudes menores a 6,5, además, consideraron que las magnitudes  $M_w$  y  $M_s$  son equivalentes hasta en una magnitud de 8,0. Por lo anterior mencionado, Parra (2016) estima la última equivalencia descrita en un valor de 7,8. Por otro lado, también proponen una segunda opción que consiste en usar relaciones empíricas de conversión, tal es el caso de la ecuación que describe la relación entre las magnitudes  $M_w$  y  $m_b$  reportado por ISC, según se muestra en la ecuación (10)

$$M_{WGCMT} = 0,93m_{bISC} + 0,6 \quad (10)$$

Parra (2016), citando a Benito et al. (2010), describe que para eventos sísmicos registrados con magnitud ML se debería usar la correlación propuesta en la ecuación, que reflejaría un aumento aproximado de 0,1 en sus valores. Otra característica destaca por el autor muestra que, para los sismos registrados con la magnitud UK y, dado que

no se ha encontrado alguna solución o correlación, se asume su equivalencia a la magnitud  $M_w$ . (Cabe resaltar que en la presente investigación se ha encontrado únicamente 2 sismos con dicha particularidad). Adicionalmente, se hace una modificación al sismo ocurrido el 31 de enero de 1906, asignando un valor de 8,8  $M_w$ , dado que un estudio realizado por Beauval et al. (2013) muestra dicha magnitud como correcta.

Según lo descrito por Quinde & Reinoso (2016) se debe considerar que los sismos registrados con magnitud  $M$ , dado que no existe relaciones o ecuaciones que muestren una conversión, son asumidos como  $M_w$ . Adicionalmente, la Ecuación 10 se muestra para la conversión para toda magnitud de tipo  $m_b$ .

Dentro de la información recopilada para este estudio, se han encontrado otras magnitudes que no han sido mencionadas en otras investigaciones referentes al territorio ecuatoriano, por lo que se ha procedido a buscar ecuaciones de conversión internacionales, tal es el caso de la magnitud  $M_{jma}$  (sismos registrados por la Agencia Meteorológica de Japón), en la que Scordilis (2005) propone una ecuación equivalente para  $M_w$  (para una magnitud mayor a 5.5  $M_{jma}$ ), que se muestra en la ecuación (11)

$$M_w = 0,58m_{jma} + 2,25 \quad (11)$$

Adicionalmente, se ha encontrado un evento sísmico con magnitud  $M_G$ , que según Guglielmi & Klain (2019) es la designación de unidad para describir a la magnitud global diaria (GDM), que vincula datos de energía y el día de ocurrencia del evento sísmico, tomando como base a la magnitud  $M$  de la escala Richter; dado que no se ha encontrado bibliografía adicional o relaciones con otras magnitudes, se ha optado por asumir su equivalencia a  $M_w$ . En la Tabla 8 se muestra todas las consideraciones tomadas para la homogenización del catálogo en el presente proyecto.

**Tabla 8***Consideraciones para la homogenización del catálogo sísmico*

<b>Magnitud</b>	<b>Forma de conversión</b>	<b>Resolución</b>
M	Convención	M equivalente a Mw
mb	Diferencia según magnitud:	
	mb<6	Mw=0,93mb+0,6
	mb>=6	mb equivalente a Mw
MD	Diferencia según magnitud:	
	MD<6,5	MD equivalente a Mw
MG	Convención	MG equivalente a Mw
Mjma	Relación global de conversión:	
	Mjma >= 5,5	Mw=0,58*Mjma+2,25
ML	Ecuación de conversión	Mw=0,821ML+0,8975
Ms	Diferencia según magnitud:	
	Ms<=7,8	Ms equivalente a Mw
	Ms>7,8	Valor según el evento en particular
UK	Convención	UK equivalente a Mw
	Evento sísmico 31/01/1906	Selección de valor 8,8Mw

Finalizado este proceso, el catálogo sísmico se encuentra homogenizado con magnitudes en Mw que van desde 0,9 hasta 8,8, recalando que el número de eventos sísmicos no ha disminuido por ninguna circunstancia (21718 sismos).

***Depuración del catálogo sísmico***

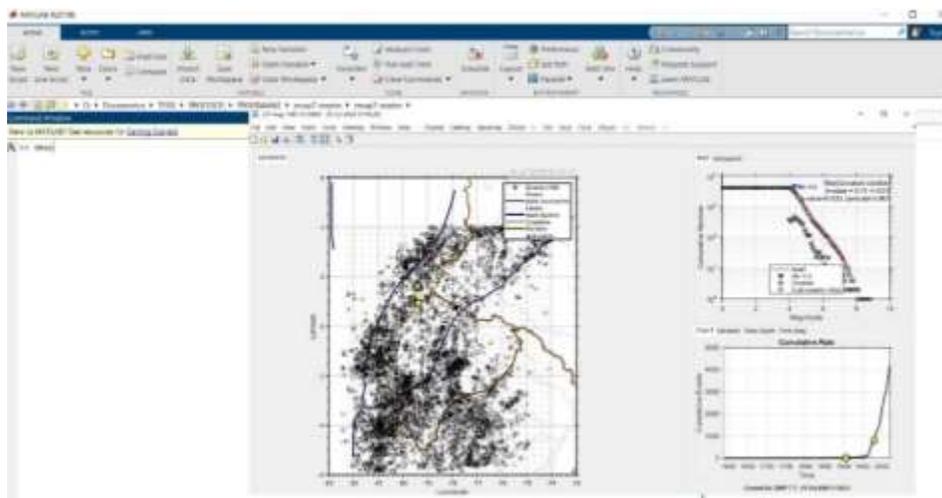
Como se ha descrito anteriormente, el proceso de depuración o declustering, consiste en la eliminación de eventos considerados (según el método a usar) como premonitores o réplicas, para que el catálogo sísmico resultante contenga únicamente eventos sísmicos principales y su completitud sea adecuada para futuros cálculos.

Por la cantidad de datos a procesar, se han evaluado varias opciones tecnológicas para realizar la depuración del catálogo sísmico, en primera instancia, se ha considerado el paquete de software conocido como ZMAP, desarrollado por Wiemer (2001), tiene una poderosa interfaz visual donde se pueden realizar una gran variedad de procesos estadísticos para un catálogo sísmico además, de calcular las relaciones Gutenberg-Richter para análisis de completitud del mismo, aunque cabe resaltar que este software está diseñado para usarse dentro del software Matlab (específicamente

en la versión 2019b o superiores), por lo que se ha requerido una licencia para el uso del mismo. En la Figura 38 se muestra el entorno de trabajo de ZMAP.

### Figura 38

*Entorno visual de Zmap*



También se han considerado opciones de software libre, que presten una igual o mejor solución que la anterior mencionada, destacando la Librería de Sismología Estadística, conocida de manera más común como Statistical Seismology Library (SSLib) realizada por Brownrigg (2005) en el lenguaje de programación R, que contiene varios catálogos sísmicos con herramientas para su manipulación y tratamiento estadístico junto a modelos estocásticos; en específico, el paquete concerniente a la investigación corresponde al de funciones básicas de SSLib (entre ellas la depuración de catálogos sísmicos), llamado SSBase, que adicionalmente muestra ejemplos sobre otras funciones que contiene todo el paquete.

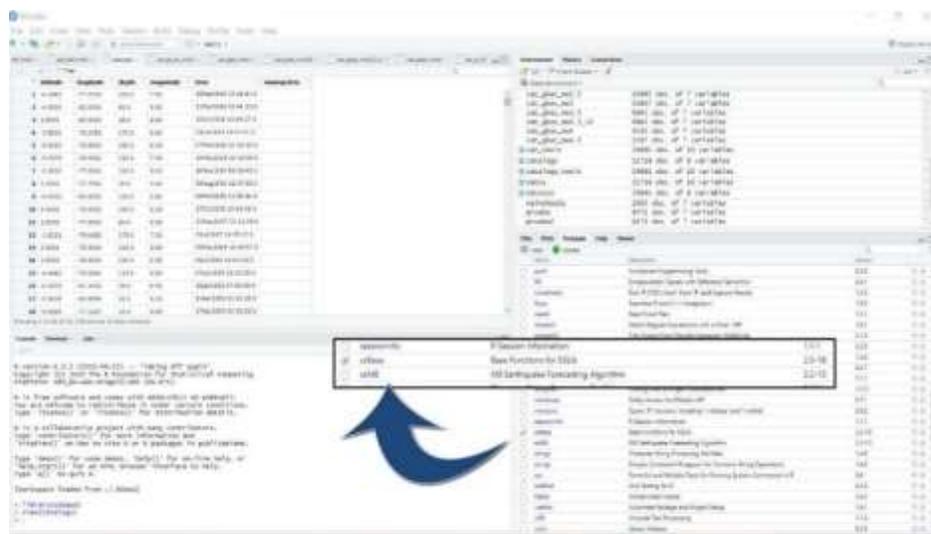
Cabe destacar que, para el uso del paquete descrito anteriormente, se ha realizado la instalación del software RStudio, con ello, se ha procedido a editar el catálogo sísmico obtenido en el inciso anterior, borrando el campo llamado “date” y cambiando su formato de presentación a csv (archivo delimitado por comas).

Posteriormente, se ha realizado la captura de la información para que el archivo sea

leído como un objeto tipo “catalogue” (según describe el paquete SSLib). En la Figura 39 se muestra en entorno de trabajo de RStudio con la lectura de la información correspondiente.

**Figura 39**

*Entorno de trabajo en RStudio*



**Evaluación del método de depuración del catálogo sísmico.** Existen algunas alternativas para realizar la depuración de un catálogo sísmico, para esta investigación se han considerado la descrita por Reasenberg (1985) y por Gardner & Knopoff (1974) (conocida como GK 74), considerando esta última como la seleccionada para el presente proyecto, dada su compatibilidad con el paquete de software y su anterior uso en otras investigaciones sísmicas en el territorio ecuatoriano.

El método GK 74 consiste en la realización de ventanas o límites, espaciales y temporales, partiendo de la magnitud del terremoto principal a identificar, con ello, todos los demás sismos con una igual o menor magnitud que el principal dentro de un área y temporalidad especificados, se califican como dependientes y por ende se considera su eliminación del catálogo sísmico; dichas ventanas espaciales y temporales se

relacionan con la magnitud del sismo principal a través de funciones logarítmicas, que se muestran en las ecuaciones (12) y (13).

$$\log T = a_1 M + b_1 \quad (12)$$

$$\log L = a_2 M + b_2 \quad (13)$$

En donde:

- ✓  $T$ , es el tiempo en días
- ✓  $L$ , es la distancia en kilómetros
- ✓  $M$ , es la magnitud del sismo principal en Mw
- ✓  $a_1, a_2, b_1$  y  $b_2$ , son constantes numéricas

Parra (2016) ha determinado las constantes para el territorio ecuatoriano a través de diferentes series sísmicas identificadas, cuyas relaciones se muestran en las ecuaciones 14 y 15.

$$\log T = 0,68M - 1,57 \quad (14)$$

$$\log L = 0,17M + 0,70 \quad (15)$$

Por otro lado, uno de los paquetes de SSLib, llamado ssM8, contiene una herramienta para la depuración de catálogos sísmicos y usa la metodología de las ventanas espaciales y temporales, con sus respectivos valores por defecto, con todo ello, se ha procedido a evaluar los 3 valores de límites espaciales y temporales correspondientes a los que provee GK 74 por default, GK 74 determinado para Ecuador y el desarrollado por el paquete ssM8, que se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Límites espaciales y temporales para la depuración del catálogo sísmico*

Magnitud (Mw)	GK 74 por default		GK 74 para Ecuador		ssM8	
	Tiempo (Días)	Espacial (Km)	Tiempo (Días)	Espacial (Km)	Tiempo (Días)	Espacial (Km)
8,0	985	94	7413	115	1096	200

Magnitud (Mw)	GK 74 por default		GK 74 para Ecuador		ssM8	
	Tiempo (Días)	Espacial (Km)	Tiempo (Días)	Espacial (Km)	Tiempo (Días)	Espacial (Km)
7,5	960	81	3388	94	913	150
7,0	915	70	1549	78	730	100
6,5	790	61	708	64	365	100
6,0	510	54	324	52	183	50
5,5	290	47	148	43	183	50
5,0	155	40	68	35	91	50
4,5	83	35	31	29	46	40
4,0	42	30	14	24	23	40
3,5	22	26	6	20	11	40
3,0	11,5	22,5	3	16	6	30
2,5	6	19,5	1	13	-----	-----
2,0	-----	-----	1	11	-----	-----

Otro factor que se ha considerado es la magnitud de corte (conocido también como cutoff magnitude), cuyo valor muestra la magnitud mínima a considerar dentro de la depuración, es decir, los valores que se encuentren por debajo de la magnitud de corte son descartados desde una primera instancia. Dada el amplio rango existente en el catálogo inicial del proyecto, se ha considerado varias magnitudes de corte que van desde 2 Mw hasta 4,5 Mw con aumento de 0,5 Mw. Posteriormente, se ha realizado un primer análisis con el número de eventos sísmicos que contendría el catálogo depurado junto al porcentaje de réplicas obtenidas por el proceso, en la Tabla 10 se muestran todas las variaciones para la depuración sísmica tomadas en consideración para el proyecto.

**Tabla 10**

*Evaluaciones realizadas a la depuración sísmica del proyecto*

Magnitud de corte	GK 74 por default			GK 74 para Ecuador			ssM8		
	Eventos sísmicos resultantes	Número réplicas	Porcentaje Réplicas	Eventos sísmicos resultantes	Número réplicas	Porcentaje Réplicas	Eventos sísmicos resultantes	Número réplicas	Porcentaje Réplicas
2,0	10272	6671	39,4%	12302	5123	29,4%	10242	7244	41,4%
2,5	9081	5986	39,7%	10982	4518	29,1%	8930	6639	42,6%
3,0	8571	5736	40,1%	10607	5736	35,1%	8571	6399	42,7%
3,5	6319	2786	30,6%	6945	2267	24,6%	6203	3132	33,6%
4,0	3966	1267	24,2%	4182	1132	21,3%	3908	1431	26,8%
4,5	2094	533	20,3%	2167	516	19,2%	2065	624	23,2%

Cada uno de los resultantes de las depuraciones realizadas aparecieron en el software a manera de tablas (tipo “catalogue”), con los campos de latitud, longitud, profundidad, magnitud, fecha (en formato de fecha juliana) y el número de réplicas asociadas a los terremotos principales identificados. Con este último, se ha realizado una nueva evaluación, considerando las réplicas obtenidas junto a su terremoto principal y comparándolos con los informes sísmicos realizados por el IG-EPN. Por ejemplo, se ha encontrado depuraciones que asocian una gran cantidad de réplicas a eventos sísmicos ocurridos durante el año 2008, pero según lo descrito por Segovia (2009) dicho año tuvo una actividad sísmica muy baja, por lo que tal depuración es errónea.

Otro error que se ha encontrado corresponde a una asignación equivocada de las réplicas con el evento principal, con todo aquello, se ha considerado como válido el catálogo sísmico con magnitud de corte 4,0 Mw y con los parámetros del GK 74 para Ecuador.

### ***Complejidad del catálogo sísmico***

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el análisis de complejidad muestra la magnitud y la temporalidad adecuados en la que un catálogo sísmico homogenizado y depurado, es apto para su uso en diferentes estudios y, para esta investigación se ha requerido conocer, principalmente, la época en la que el catálogo sísmico muestra resultados continuos para los procesos de estimación sísmica correspondientes.

**Magnitud de complejidad.** Para la determinación de la magnitud de complejidad se ha utilizado la relación Gutenberg-Richter, que combina a través de funciones logarítmicas, la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos en una determinada zona (Gutenberg & Richter, 1944). En la ecuación (16) se muestra dicha relación.

$$\log N(m) = a - b * m \quad (16)$$

Donde:

\* N es el número de sismos ocurridos dentro de un área con magnitud mayor o igual a m

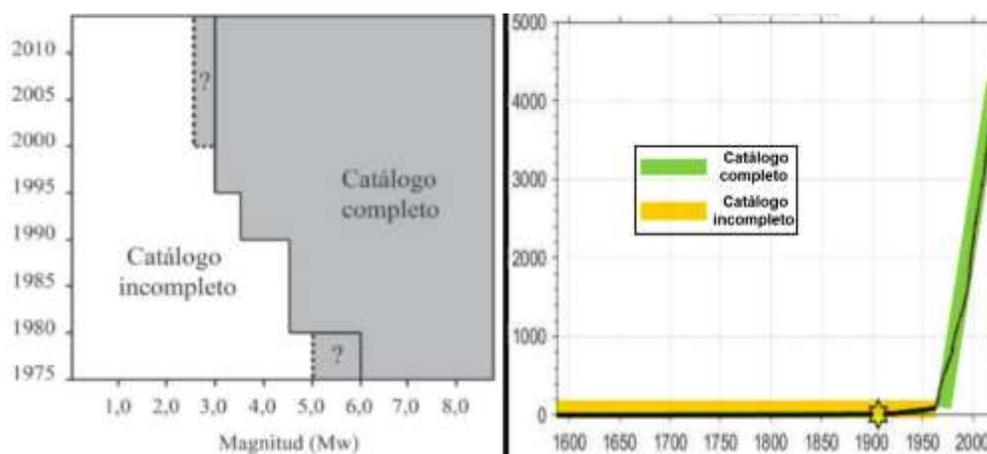
\* m es la magnitud sísmica

\* a y b son valores estimados, con los cuales se puede estimar la tasa anual de terremotos y la proporción existente entre el número de sismos de gran y menor magnitud, respectivamente.

**Temporalidad del catálogo sísmico.** En cambio, para determinar la temporalidad en la que el catálogo sísmico del proyecto es completo, se ha realizado a través de 2 formas, la primera, denominada como “método gráfico” que, según Quinde & Reinoso (2016) aporta con la visualización de la época y magnitud mínimos de completitud del catálogo a través de la comparación entre el número acumulado de eventos sísmicos ocurridos y el año en que éstos ocurrieron. En la Figura 40 se muestra dicho método.

**Figura 40**

*Método gráfico para la completitud del catálogo sísmico*



*Nota.* Adaptado de Arroyo, Godínez, & Linkimer (2017)

El segundo método, es de tipo estadístico propuesto por Stepp (1972) quien describe que, la desviación estándar ( $s$ ) referente a la tasa media de ocurrencia de sismos registrados ( $M$ ) en una temporalidad acumulada específica ( $T$ ), viene calculada por la ecuación (17). Considerando una tasa media acumulada constante (teórica), su desviación estándar correspondería a la Ecuación (18). Por lo tanto, un rango de magnitud analizado en un período de tiempo se declara completo cuando la tendencia de la desviación estándar  $s$  es muy similar a la determinada por una tasa media constante, si no cumple dicha premisa, se considera como incompleto al intervalo estudiado.

$$s = \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (17)$$

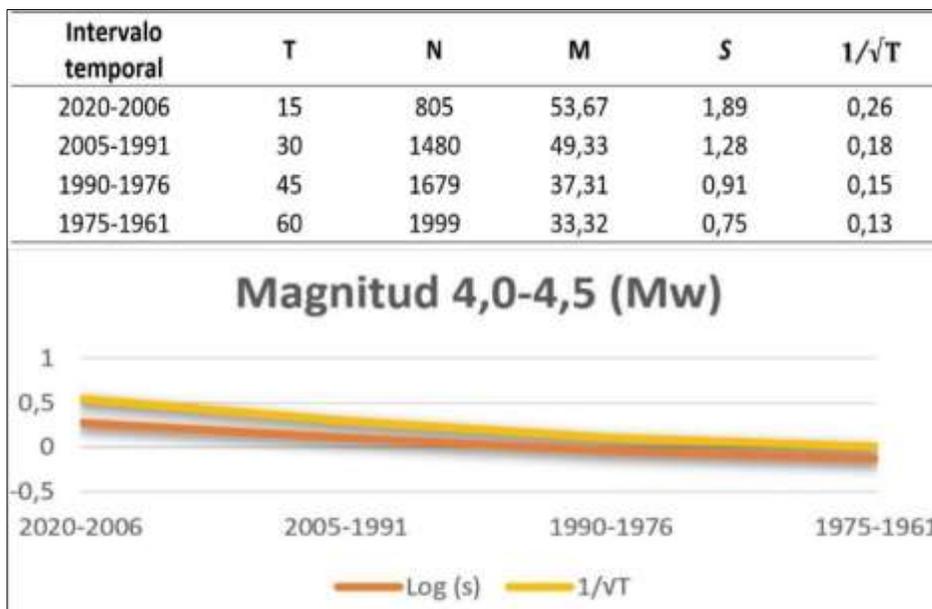
$$s = \frac{1}{\sqrt{T}} \quad (18)$$

Dado que, la desviación estándar calculada difiere ampliamente y, considerando que sólo se desea comparar la tendencia con la desviación teórica, se ha realizado el análisis usando el logaritmo en base 10 de la desviación calculada. Adicionalmente, el estadístico a usar en este método es el Coeficiente de Correlación.

Para este estudio, se ha considerado realizar intervalos de magnitud de 0,5 Mw con su similar de temporalidad de 15 años, esto último debido a la gran amplitud del catálogo sísmico, con ello y, para cada intervalo, se ha procedido a calcular las desviaciones estándar correspondiente, además de graficar ambas desviaciones. A manera de ejemplo, en la Figura 41 se muestran los cálculos realizados en un intervalo de magnitud del catálogo sísmico.

**Figura 41**

*Análisis de completitud por el método de Stepp*



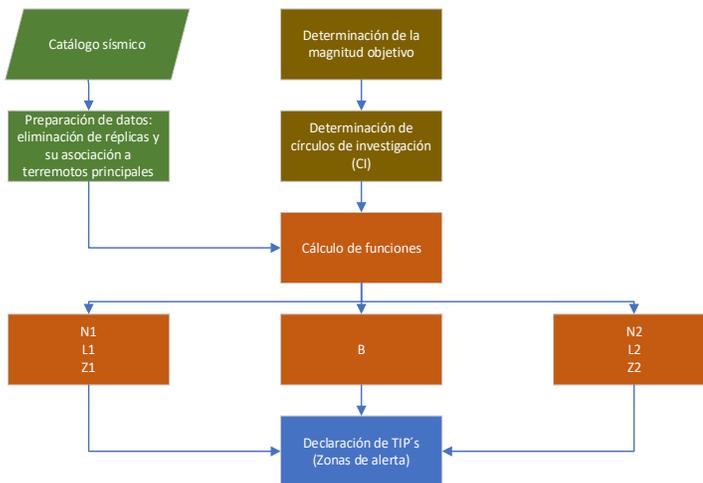
### **Cálculo del Algoritmo M8**

#### ***Breve descripción del proceso para el cálculo del algoritmo***

El algoritmo M8 consta de varios parámetros, los cuales pueden usarse por defecto, pero autores como Flores (2011), Mojarab, Ismail-Zdeh & Kossobokov (2011) y Memarian, Mehdi, & Kossobokov (2014) recomiendan y concluyen que, se debe realizar un análisis retrospectivo que evalúa eventos sísmicos anteriores registrados en el catálogo sísmico que cumplan con la magnitud a considerar, para así determinar posibles variaciones en los círculos de investigación, límites de sismos anuales, entre otros. En la Figura 42 se muestra el proceso de cálculo para el algoritmo M8 por defecto.

**Figura 42**

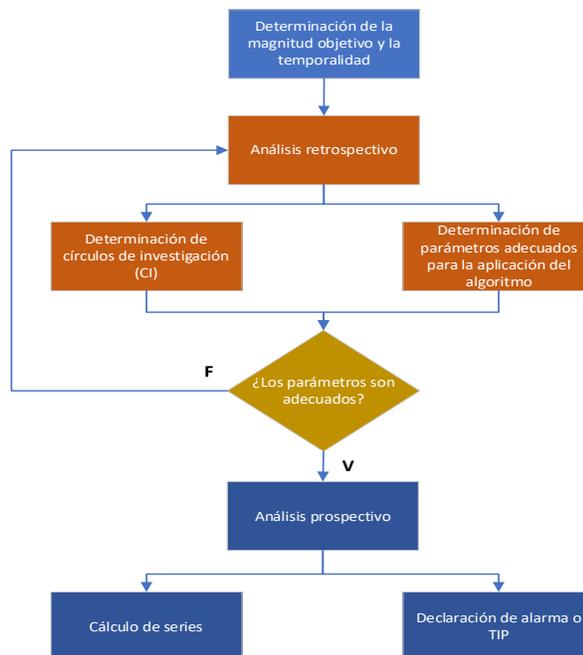
*Cálculo del Algoritmo M8 con parámetros por defecto*



A manera de realizar una explicación inicial sobre el procedimiento realizado en este proyecto para el cálculo de dicho algoritmo, en la Figura 43 se muestra los procesos principales que se requieren y, en apartados subsecuentes se ha detallado cada uno de ellos.

**Figura 43**

*Proceso para el cálculo del Algoritmo M8 en el proyecto*



### ***Determinación de la magnitud objetivo y temporalidad***

Antes de la determinación de los demás parámetros que definen el algoritmo M8 (límites de magnitudes, períodos temporales de análisis, entre otros), se requiere de constantes iniciales. En primera instancia, para la determinación de la magnitud objetivo, no tiene consideraciones rigurosas, por lo que el investigador tiene libre albedrío para escogerla.

Para este proyecto se ha tomado en cuenta los eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos en el país recientemente y que han llevado a grandes pérdidas, tanto materiales como de vidas humanas, para posteriormente llevarlo a un número entero, dado que, las investigaciones que se han realizado a nivel mundial recomiendan (de manera implícita) dicha aproximación, por lo que, para el presente proyecto se ha considerado una magnitud de 7,0 Mw.

Por otro lado, se debe conocer desde qué temporalidad el catálogo sísmico se considera como completo para así, a la hora de realizar el cálculo respectivo se realice la discriminación respectiva, por lo que, se ha considerado completo al catálogo de este proyecto para efectos del cálculo del algoritmo M8 desde el 1 de julio de 1963.

Adicionalmente, se debe considerar el tiempo de vigencia de la alerta generada luego de su cálculo respectivo y, dado que ningún trabajo realizado con dicho parámetro ha recomendado modificaciones sobre las ventanas temporales de análisis, se consideran los parámetros por defecto, que describen espacios de análisis de 6 meses y una alerta de 5 años para el análisis prospectivo. Estos últimos valores deben ser fijados previamente dado que, el análisis retrospectivo requiere recrear las condiciones de cálculo para que los demás parámetros a evaluar sean adecuados para las diferentes características del registro sísmico ecuatoriano.

### **Análisis retrospectivo**

En este apartado se han realizado 2 procesos importantes, el primero que aporta a la determinación del círculo de investigación (área circular en la que se calcula el algoritmo) y la determinación de los parámetros adecuados para que el algoritmo sea más eficaz en el territorio ecuatoriano (específicamente, los límites del número de sismos a evaluar).

**Determinación del Círculo de Investigación (CI).** Para la determinación de los círculos de investigación, se ha optado por realizar una búsqueda exhaustiva en documentos técnico-científicos en los que se muestren diferentes formas de calcularlo, llegando a considerar las ecuaciones propuestas por Keilis-Borok & Kossobokov (1990a) (que es la ecuación por defecto del algoritmo) y Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov (2014) (que es una modificación contrastada por uno de los autores originales del algoritmo), en las ecuaciones (19) y (20), se muestran dichas expresiones, respectivamente.

$$R(M_0) = (\exp(M_0 - 5.6) + 1) * \left(\frac{111.11}{2}\right) \quad (19)$$

$$R(M_0) = (\exp(M_0 - 5.6) * \beta + 1) * \left(\frac{111.11}{2}\right) \quad (20)$$

Donde:

- \*  $M_0$  es la magnitud objetivo del algoritmo, en Mw
- \* R es el radio del CI, en Km
- \*  $\beta$  es un factor adimensional que puede tomar valores de 1; 1,25; 1,50; 1,75; 2, según corresponda.

Dados los diferentes valores que puede tomar  $\beta$ , se han considerado 5 posibles radios para usarse como CI, cabe resaltar que si  $\beta$  es igual a 1, correspondería al

mismo valor calculado por la ecuación por defecto; dichos valores se presentan a continuación, en la Tabla 11.

**Tabla 11**

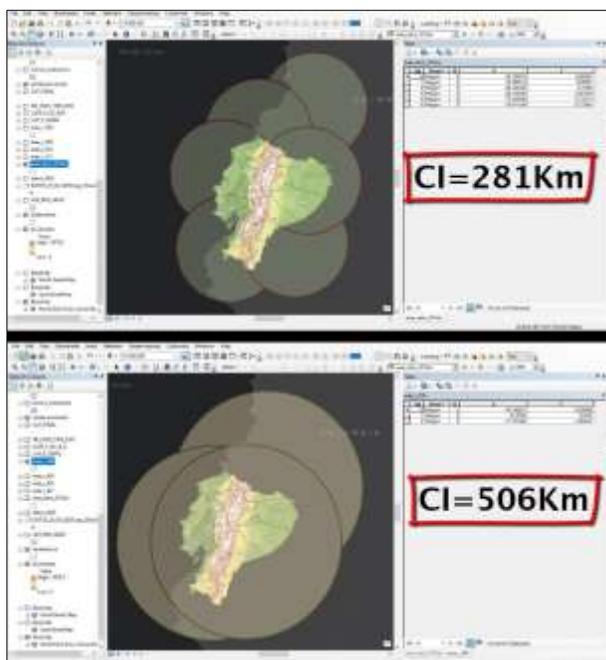
*Valores considerados como posibles CI del proyecto*

Valores de $\beta$	Posible CI (Km)
1,00	281
1,25	337
1,50	393
1,75	450
2,00	506

Posteriormente, se ha procedido a través del software ArcMap a espacializar los diferentes CI en toda la zona de estudio, procurando que exista un traslapeo entre cada CI y se ha calculado el centro de cada CI. A manera de ejemplo, en la Figura 44 se muestran los CI correspondientes a 281 Km y 506 Km, dentro del software mencionado.

**Figura 44**

*CI para análisis retrospectivos del proyecto*



**Determinación de parámetros idóneos a la zona de estudio.** Por otro lado, para la determinación de los parámetros que sean acordes al territorio ecuatoriano en la aplicación del algoritmo, al igual que los CI, se ha considerado una recopilación de

información científica, donde se han encontrado que el único cambio que genera ajustes importantes al cálculo es la variación en los límites de sismos a evaluar (como se ha mencionado en apartados anteriores, para el cálculo de las series, se tienen 3 fórmulas que se calculan en 2 ocasiones, una con límite de 10 sismos y otro con 20 sismos).

Con lo anterior dicho, se ha tomado las diferentes variaciones propuestas por Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov (2014) por su homogeneidad y su fácil adaptabilidad al presente proyecto, en la Tabla 12 se muestran dichos valores.

**Tabla 12**

*Variaciones en los Límites de las funciones para el algoritmo M8*

<b>Nro. Variación</b>	<b>Límite Función 1</b>	<b>Límite Función 2</b>
1 (por defecto)	<b>10</b>	<b>20</b>
2	<b>5</b>	<b>10</b>
3	<b>4</b>	<b>8</b>
4	<b>3</b>	<b>6</b>
5	<b>2</b>	<b>4</b>
6	<b>1</b>	<b>2</b>

**Análisis combinatorios entre CI y parámetros.** Con ambos parámetros y sus respectivas variaciones definidos, se ha realizado 2 evaluaciones, para definir la mejor combinación a usar en el posterior análisis prospectivo del algoritmo M8, todo esto a través de un paquete de funciones que forma parte de SSLib denominado como ssM8, el cual está diseñado para el cálculo de las series de tiempo para la determinación de un TIP, además (como se ha mencionado en apartados anteriores) se encuentra escrito en lenguaje R y se trabaja a través del software RStudio.

El paquete ssM8 cuenta con una función denominada M8, la cual, a través de otras funciones complementarias, devuelve como resultado el cálculo de las 7 series de tiempo mencionadas en el anterior capítulo y, adicionalmente incluye una adicional (llamada Critical Series) que aporta a la interpretación del tipo de alerta que genera el algoritmo, la cual puede ser:

- STIP (Successful TIP): Advertencia satisfactoria, es decir, un evento de magnitud  $M_0$  en período de 5 años desde su declaración ha ocurrido.
- STIP- (Nearly successful TIP): Cuando un terremoto que describe la condición  $M_0 \leq M_0 - 0,5$  ha ocurrido en el período de 5 años desde su declaración.
- CTIP (Continuous TIP): Alerta vigente, existe un TIP en el cual aún no ha ocurrido un sismo de magnitud  $M_0$  dentro del período de 5 años.
- FTIP (False TIP): Alerta fallida, un sismo de magnitud  $M_0$  o más no ha ocurrido dentro del período de 5 años.
- c.e: Cuando un TIP es desencadenado por un terremoto con una magnitud  $\geq M_0$ .

Otra característica importante del paquete ssM8, es que tiene la capacidad de generar el gráfico correspondiente de las funciones descritas anteriormente con una simbología de las posibles alertas existentes. En la Tabla 13 se muestran los parámetros y argumentos usados por dicha función, con sus respectivos valores a usar en el presente proyecto de investigación.

**Tabla 13**

*Parámetros y argumentos usados para el análisis retrospectivo*

Parámetro/ Argumento	Descripción	Valor
<b>catalogue</b>	Catálogo sísmico depurado, homogenizado	<b>N/A</b>
<b>M0</b>	Magnitud objetivo	<b>7,0</b>
<b>centrelong</b>	Coordenada de longitud del centro del CI	<b>Varios</b>
<b>centrelat</b>	Coordenada de latitud del centro del CI	<b>Varios</b>
<b>radius</b>	Radio del CI	<b>Varios</b>
<b>minday</b>	Fecha desde la cual se considerará para el algoritmo (día juliano)	<b>1/1/1953</b>
<b>start.series</b>	Fecha en la que inicia el cálculo de las series de tiempo	<b>1/7/1963</b>
<b>training</b>	Forma de la distribución empírica de cada serie (3 tipos: "moving", "all", "user")	<b>user</b>
<b>end.training</b>	Fecha en la que finaliza el cálculo de las series de tiempo	<b>1/7/2019</b>
<b>running.total</b>	Años consecutivos para el cálculo de las series (semestrales)	<b>12 (6 años)</b>
<b>smoother</b>	Suavizado para el cálculo de las series, entero (semestrales)	<b>6 (3 años)</b>
<b>TIP.length</b>	Duración de la alerta (semestrales)	<b>10 (5 años)</b>
<b>plotit</b>	Permite graficar las series de tiempo del algoritmo M8	<b>True</b>

Parámetro/ Argumento	Descripción	Valor
<b>title</b>	Título para los gráficos a generar	<b>N/A</b>
<b>debug</b>	Valor lógico impuesto por defecto	<b>False</b>

*Nota.* El valor N/A se refiere a que ingresa un objeto o variable declarado dentro del software mientras que Varios, son los parámetros/argumentos que han sido sujetos de evaluación en el análisis retrospectivo.

El primer análisis se ha realizado tomando en cuenta cada variación de límite de sismos con cada CI y posteriormente, se ha realizado el cálculo de las series de tiempo en cada CI, cubriendo toda el área de estudio (a manera de imitar un cálculo de algoritmo M8), con todo ello, se ha evaluado el número de sismos que han cumplido con la condición  $M_0 \geq 7,0$  Mw y que hayan sido tomados como TIP al correr el algoritmo y mostrando su resultado de manera porcentual, para así evaluar su eficacia, así como se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Primer análisis retrospectivo del algoritmo M8*

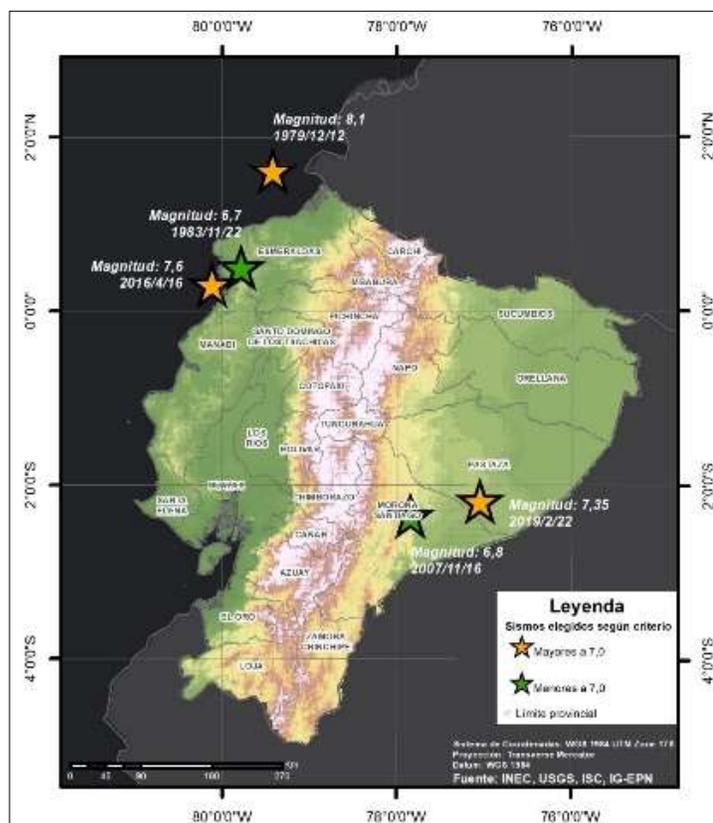
Límite	CI (Km)	Sismos $M_0 \geq 7,0$	Sismos detectados	Porcentaje efectividad (%)
10-20	281	3	1	33,33%
	337	4	1	25,00%
	393	3	1	33,33%
	450	5	2	40,00%
	506	7	1	14,29%
5-10	281	3	1	33,33%
	337	5	3	60,00%
	393	4	3	75,00%
	450	5	4	80,00%
	506	7	2	28,57%
4-8	281	3	1	33,33%
	337	5	4	80,00%
	393	4	3	75,00%
	450	5	4	80,00%
	506	7	2	28,57%
3-6	281	3	2	66,67%
	337	5	4	80,00%
	393	5	4	80,00%
	450	7	4	57,14%
	506	7	3	42,86%
2-4	281	3	2	66,67%
	337	5	3	60,00%
	393	5	3	60,00%
	450	7	3	42,86%
	506	7	2	28,57%

Límite	CI (Km)	Sismos M0 ≥ 7,0	Sismos detectados	Porcentaje efectividad (%)
	281	3	0	0,00%
	337	5	1	20,00%
1-2	393	5	1	20,00%
	450	7	0	0,00%
	506	7	0	0,00%

Posteriormente, y como proceso previo a un segundo análisis, se ha seleccionado los límites y los CI que generaron los mejores porcentajes y se ha tomado en cuenta 5 sismos que se sitúan en diferentes temporalidades, 3 de los cuales cumplen con la condición anteriormente mencionada (2019, 2016, 1979), y los 2 restantes (2007, 1983) coinciden con  $M_0 < 7,0$  Mw, con ello se procede a espacializar los diferentes CI, tomando como centro de los mismos a los sismos considerados. La Figura 45 muestra la ubicación de los sismos mencionados con anterioridad.

#### Figura 45

*Ubicación de los sismos considerados para segunda evaluación*



Con ese paso previo realizado, se ha procedido con la segunda evaluación, que consiste en volver a correr el algoritmo M8 en cada CI, para así comprobar qué parámetros son los que detectan de manera correcta, tanto un STIP como un FTIP y con ello, finalmente se han obtenido los valores más aptos para un análisis prospectivo en el territorio ecuatoriano. En la Tabla 15 se muestra el resumen de dicha evaluación.

**Tabla 15**

*Resumen de la segunda evaluación retrospectiva al algoritmo M8*

Posibles combinaciones		Sismos evaluados				
CI	Límites	2019	2016	2007	1983	1979
337	5--10	STIP-	FTIP	FTIP	FTIP	N/A
393		STIP-	N/A	FTIP	ERROR	N/A
450		STIP-	FTIP	ERROR	ERROR	N/A
337	4--8	STIP-	N/A	N/A	FTIP	N/A
393		STIP-	N/A	N/A	ERROR	N/A
450		STIP-	FTIP	ERROR	ERROR	N/A
337	3--6	STIP	STIP	FTIP	FTIP	N/A
393		STIP	STIP	FTIP	ERROR	N/A
450		STIP	STIP	ERROR	ERROR	N/A
450	2--4	STIP	FTIP	ERROR	ERROR	N/A

*Nota.* El valor N/A se refiere que el algoritmo no detectó al sismo, ni como STIP o FTIP, mientras que ERROR representa que el algoritmo no pudo concluir un resultado, debido a la temporalidad de los sismos.

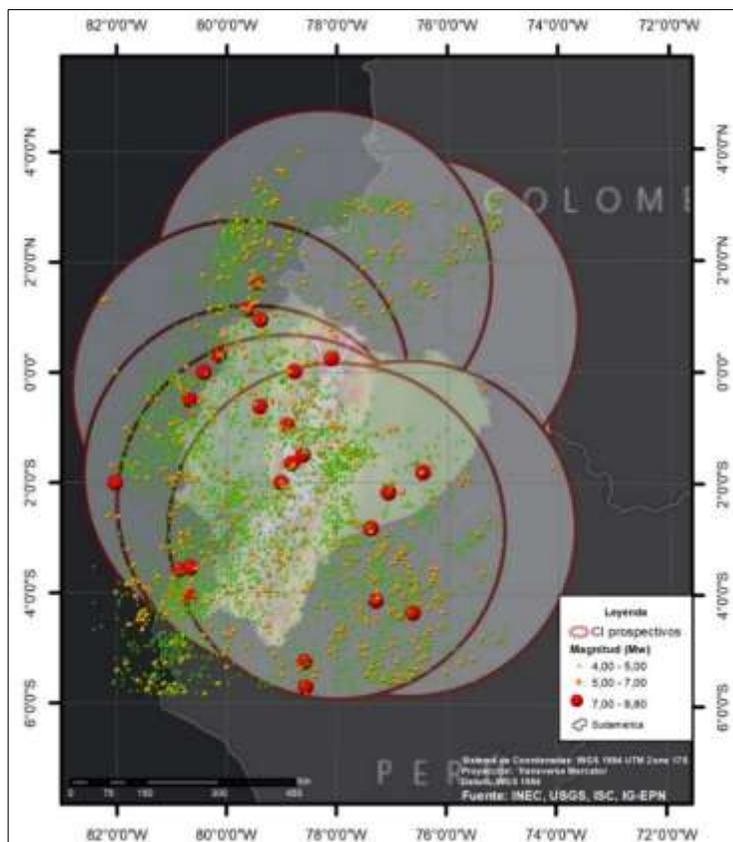
### **Análisis prospectivo**

Una vez concluido el análisis retrospectivo y obtenidos los parámetros idóneos para el presente proyecto, se ha procedido con la evaluación a futuro (5 años), dentro del área de estudio, que consiste, básicamente, en volver a utilizar el paquete ssM8 y su función M8 en los CI que traslapen con un radio definido, y con ello recopilar las diferentes soluciones que brinda cada CI y evaluar las series de tiempo resultantes (ver Figura 42).

Por lo tanto, se ha procedido a espacializar los CI correspondientes en el área de estudio y posteriormente, se ha calculado el centro de cada uno de ellos, cuya distribución se puede visualizar en la Figura 46.

Figura 46

Ubicación de CI para análisis prospectivo



Cabe resaltar que, se ha considerado más de doble traslapo entre los CI, por la temporalidad disponible dentro del catálogo sísmico y, se ha considerado al menos un 20% de área de intersección de los CI, asegurando así que toda el área de investigación tenga al menos un traslapo. Además, es importante acotar que existe una zona sin cubrir dentro del catálogo sísmico, esto fue debido a que la zona representa más información de territorio peruano, por lo que, cuando se usa el algoritmo en dicha zona han existido errores en temporalidad.

Con los CI ubicados y con sus respectivos centros calculados, se ha procedido con el cálculo de las 7 series principales del algoritmo M8 y la adicional, a través del

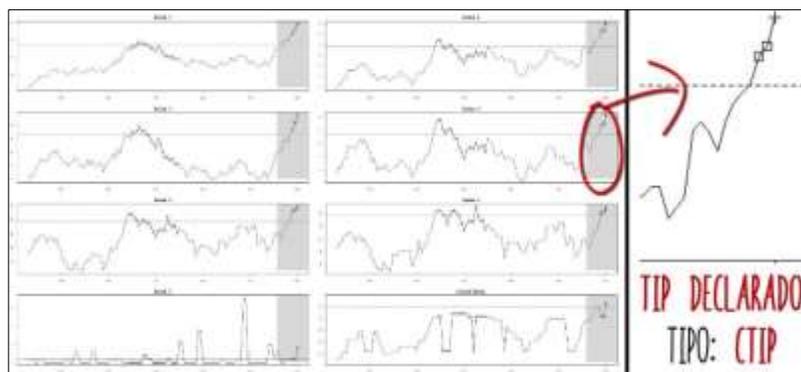
software RStudio cuyos nombres que presentan dentro del paquete ssM8 y sus correspondientes a los mostrados en el apartado teórico son los siguientes:

- **Series 1:** Números de eventos sísmicos para el límite inferior de sismos, llamada como Función N.
- **Series 2:** Números de eventos sísmicos para el límite superior de sismos, llamada también como Función N.
- **Series 3, Series 4:** Proviene de las Series 1 y 2, corresponden a la Función L.
- **Series 5, Series 6:** Usan las Series 1 y 2, en la que, la Series 5 hace uso de Series 2, mientras que Series 6 usa Series 1, corresponde a la Función Z.
- **Series 7:** Usa principalmente el catálogo sísmico, corresponde a la Función B.
- **Critical Series:** Tiene un rango entre -0.9 y 0.1, es una serie adicional en la que, si tiene 2 valores positivos consecutivos dentro de la misma, se declara un TIP.

Luego de realizado el proceso con todos los CI, se ha procedido a recopilar resultados obtenidos en el software ArcMap para su posterior interpretación, que consiste en revisar la existencia y el tipo de TIP declarado a través del algoritmo como tal y, posteriormente se analiza la tendencia que tiene cada una de las series de tiempo. A manera de ejemplo, en la Figura 47 se muestra las gráficas que resultan por la aplicación de la función M8 de un CI del presente proyecto.

### Figura 47

*Series resultantes de un CI en evaluación prospectiva*



Con todos los resultados recopilados, se ha realizado la depuración de los CI que no muestren declaraciones de TIP de tipo CTIP o que en sus respectivas gráficas de series hayan mostrado una tendencia negativa o la baja, es decir, su gráfica muestre una reducción como tal, para finalmente determinar los CI que formarían la zona de alerta para el sismo objetivo (7,0 Mw).

### ***Propuestas para optimización de zona de alerta declarada por TIP***

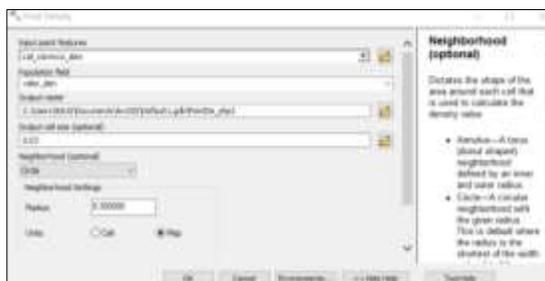
Dado que el radio que usa el algoritmo M8 es muy extenso, puede generar zonas identificadas con TIP que no brinden una respuesta efectiva a la hora de realizar estimaciones con dicho algoritmo, por lo que, se ha considerado usar 2 propuestas metodológicas cuyo resultado sean zonas donde exista una mayor probabilidad de ocurrencia de la alerta sísmica detectada, sin descartar la zona inicial determinada con anterioridad.

**Propuesta usando herramientas geoespaciales.** Por la naturaleza del proyecto de investigación, se ha considerado una metodología que use herramientas geoespaciales, por lo que, según lo describen Mojarab, Memarian, Mehdi, & Kossobokov (2014) se puede realizarlo a través del álgebra de mapas, juntando el producto resultante del algoritmo M8 con información de las áreas donde ocurren mayor cantidad de sismos (según lo registrado en el catálogo sísmico).

Por lo tanto, se ha considerado construir un mapa de densidades de puntos en función al catálogo sísmico del proyecto a través del software ArcMap, como se muestra en la Figura 48 y, con ello determinar en qué zonas es más probable que ocurra el sismo de magnitud objetivo.

**Figura 48**

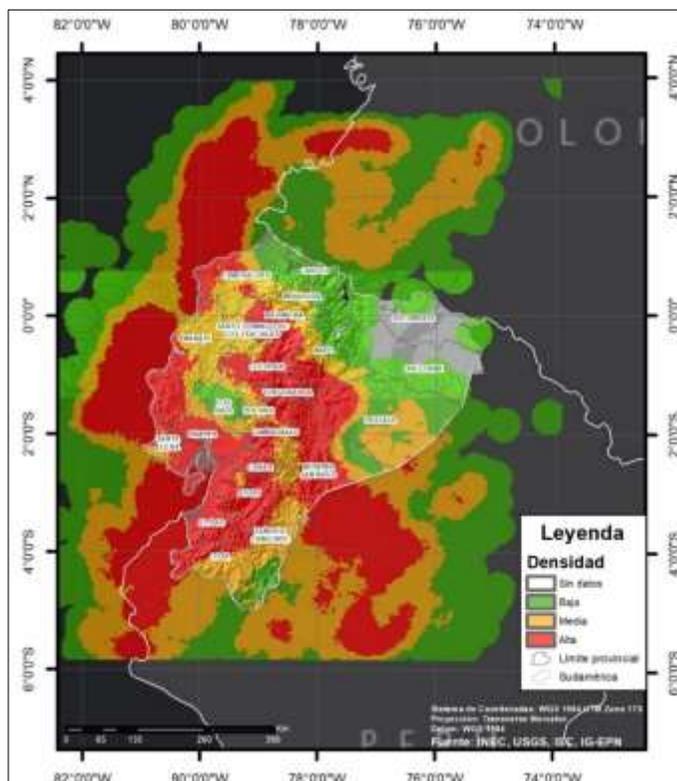
*Herramienta para el cálculo de la densidad de sismos*



Partiendo del hecho que, la densidad de puntos se basa en el cálculo de vecindad de puntos por unidad de área de unidades de mapa, se ha considerado realizar una normalización del producto resultante, para así tener una escala con valores que sean fácilmente intercambiables entre cuantitativos y cualitativos, como se puede observar en la Figura 49.

**Figura 49**

*Densidad sísmica de la zona de estudio*



**Propuesta usando Estadística.** Otra forma que se ha considerado, proviene de un análisis de carácter estadístico de la zona de alarma en función de las áreas que traslapan, considerando la premisa propuesta por la experiencia de este proyecto la cual indicaría que, un espacio de un CI que coincide con otro, puede corroborar que en dicho espacio tendría una mayor probabilidad de ocurrencia del sismo predicho.

Por lo tanto, se ha realizado un cálculo para que cada zona con traslapo contenga un valor probabilístico a través de la función de distribución Binomial (dado que sólo existen 2 únicas opciones dentro de los eventos considerados), cuya fórmula se muestra en la ecuación (21) y, posteriormente se ha procedido a desarrollar los procesos cartográficos correspondientes para su visualización.

$$P(X \leq k) = \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} p^i q^{n-i} \quad (21)$$

Donde:

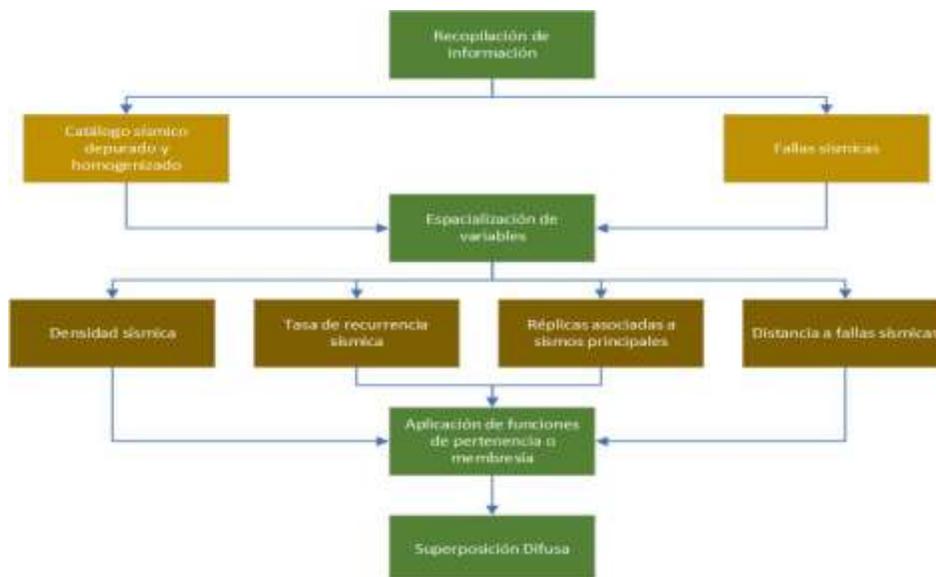
- \* n es el número total de CI que forman parte del área de alarma
- \* k es el número de veces que traslapa cada zona del área de alarma
- \* p es la probabilidad de éxito del algoritmo M8 (ver Tabla 14)
- \* q es la probabilidad de fracaso del algoritmo M8 (1-p)

### **Cálculo de Lógica Difusa**

Como se ha mencionado anteriormente, se requiere de la comparación entre los resultados obtenidos en el algoritmo M8 y el producto generado por Lógica Difusa, por lo que, luego de aplicar dicho algoritmo, se ha procedido con la evaluación correspondiente a Lógica Difusa. En la Figura 50 se muestra el proceso general seguido para dicho proceso.

**Figura 50**

*Proceso para la aplicación de Lógica Difusa*



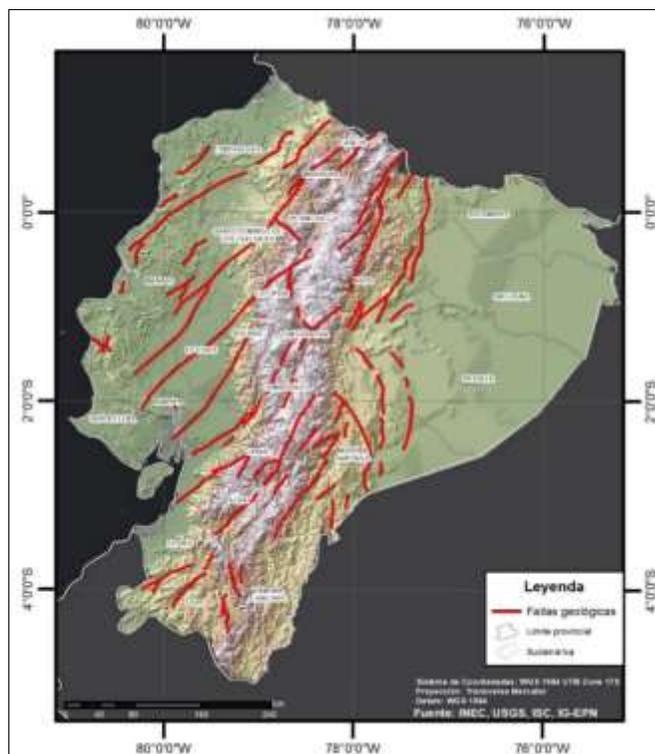
### ***Recopilación de información***

Para la aplicación de esta metodología se ha requerido, principalmente, de información que sea fácilmente espacializable o calculable, además que se encuentre asociada con la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud. Otro punto a considerar a la hora de considerar información, es la presencia o no de temporalidad, ya que, aquello podría definir de mejor manera los resultados a obtener.

Con lo anterior dicho, se ha considerado 2 fuentes importantes de información, la primera correspondiente al catálogo sísmico del proyecto por la variedad de información disponible en el mismo (magnitud, profundidad, número de réplicas asociadas, entre otros), además que, el uso del mismo insumo aportaría de manera positiva para la comparación de ambas metodologías. La segunda corresponde a las zonas donde principalmente ocurren los eventos sísmicos, estas son las fallas sísmicas, por lo que, se ha procedido a obtener dicha información geoespacial de la recopilación realizada por Bone, Reyes, Tierra, & Cruz (2017), en la Figura 51 se muestran dichas fallas en el territorio ecuatoriano.

**Figura 51**

*Fallas geológicas en el territorio ecuatoriano*



### ***Espacialización de variables***

Con los insumos básicos de información adquiridos, se han realizado algunos cálculos y geoprosesos que permitan a las variables pasar de valores discretos (tipo vector: punto, línea o polígono) a continuos (formato ráster) dentro del área de estudio. A continuación, se ha detallado cada una de las variables consideradas

**Densidad Sísmica.** Esta variable y su capa continua resultante, es la misma que se ha usado para la propuesta de la reducción de la zona de alerta provista por el algoritmo, por lo que, en apartados anteriores se especifica cómo se confeccionó.

**Tasa de recurrencia sísmica.** A través de esta variable se busca evaluar, según lo describe Gómez (2019), el comportamiento sísmico con su respectiva temporalidad. Dicho comportamiento se lo puede determinar por el cálculo de la Relación Gutenberg-Richter cuya base geoespacial es el catálogo sísmico generado.

Para la espacialización de dicha variable, en primer lugar, se ha añadido un nuevo campo llamado “gut\_rich” para que posteriormente, en el mismo se realice el cálculo de la tasa de recurrencia sísmica para cada uno de los puntos que conforma el catálogo sísmico, todo ello con la ayuda del software ArcMap. En la Figura 52 se muestra la herramienta usada para el correspondiente cálculo.

### Figura 52

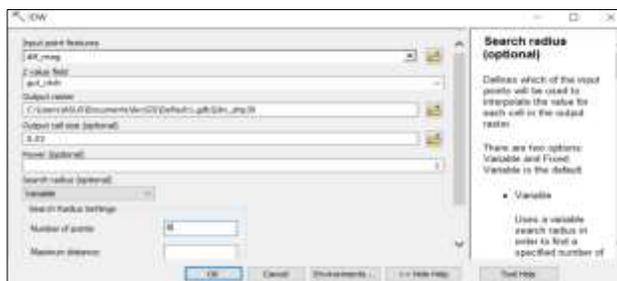
*Herramienta usada para el cálculo de la tasa de recurrencia sísmica*



Posteriormente, se ha procedido a transformar la variable calculada hacia un tipo continua (dado que se encuentra almacenada únicamente en cada punto del catálogo) a través de la herramienta de interpolación “IDW”, ya que esta variable se encuentra ligada con la distancia entre cada elemento. En la Figura 53 se muestra la herramienta enunciada anteriormente con sus parámetros y, en la Figura 54 se muestra el resultado del geoproceso detallado anteriormente.

**Figura 53**

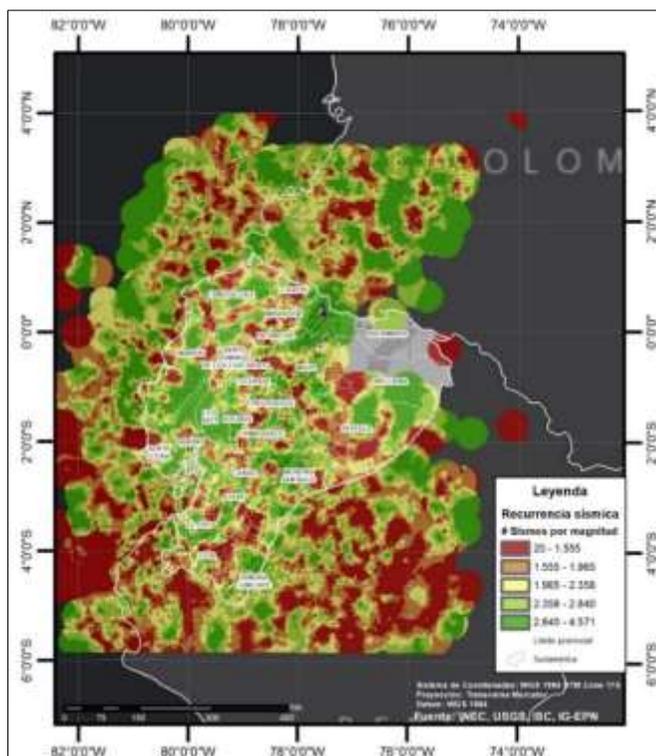
*Herramienta usada para interpolación de variables*



Cabe destacar que, el método de visualización que se ha usado corresponde a cuantiles, por la forma de distribución del producto resultantes, además que los valores mínimos representan las zonas de ocurrencia de sismos de gran magnitud, porque sigue la tendencia de disminución de la recurrencia según la magnitud sea mayor (orden inverso).

**Figura 54**

*Recurrencia sísmica en la zona de estudio*

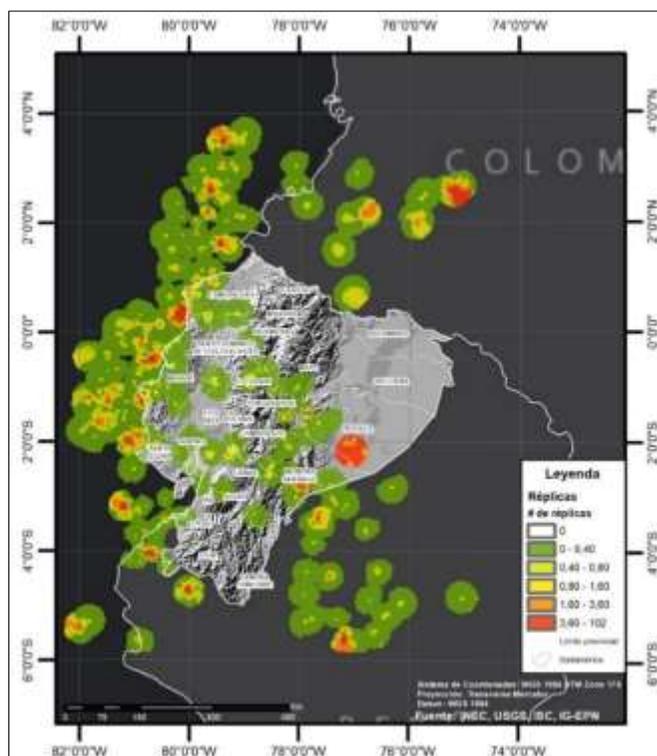


**Réplicas asociadas a sismos principales.** Se ha considerado esta variable, siguiendo el supuesto que, en un punto en el que se haya registrado un evento sísmico de gran magnitud también se encuentra asociado a un número alto de réplicas, por lo tanto, se ha tomado como base de geoinformación al campo de réplicas, determinado anteriormente en el catálogo sísmico del proyecto.

Con lo mencionado anteriormente, se ha procedido a usar la misma herramienta (IDW) para la interpolación y, para su visualización se ha usado de igual manera, el método de cuantiles. En la Figura 55 se muestra el producto resultante.

### Figura 55

*Réplicas asociadas a sismos principales*



**Fallas sísmicas.** En base a esta información, se pueden realizar cálculos adicionales que favorezcan al presente análisis, por lo que, se ha considerado determinar cuál es la distancia existente a la falla más cercana en la zona de estudio, esto por lo mencionado en apartados anteriores.



### **Aplicación de funciones de pertenencia o membresía**

Con todas las variables espacializadas, se ha procedido a seleccionar el tipo de función con sus respectivas variantes (según corresponda) para dichas variables, por lo que, se ha usado funciones sinusoidales, en específico, las que corresponden al segundo y tercer caso, por su forma de correlacionar los datos del conjunto difuso a los valores reales calculados.

Dado que existen 2 casos en la función sinusoidal, se ha realizado una clasificación en función del tipo de la curva sinusoidal, es decir, si los valores reales de menor valor son los que dan solución a la investigación, se ha seleccionado la función coseno, mientras que, si dichos valores de mayor valor son los que brindan la respuesta a la problemática, se ha optado por la función seno. En la Tabla 16 se muestran las funciones asignadas para cada una de las variables.

**Tabla 16**

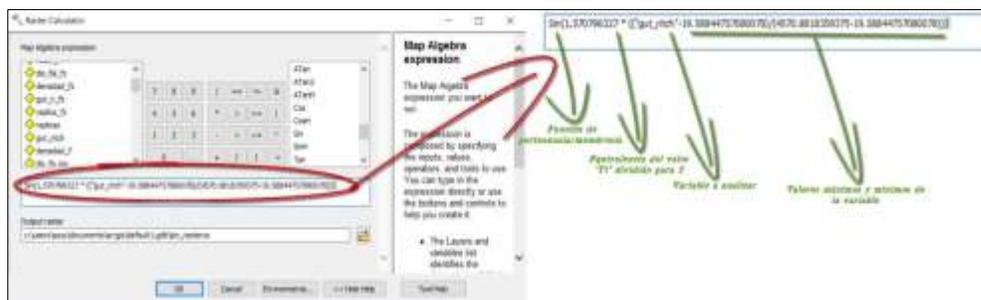
*Asignación de funciones de pertenencia a las variables de análisis*

<b>Variable</b>	<b>Tipo de función Sinusoidal</b>	<b>Fórmula</b>
Densidad sísmica	Seno	$\sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{Vo - Vmin}{Vmax - Vmin}\right)$
Tasa de recurrencia sísmica	Coseno	$\cos\left(\frac{\pi}{2} * \frac{Vo - Vmin}{Vmax - Vmin}\right)$
Réplicas asociadas a sismos principales	Seno	$\sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{Vo - Vmin}{Vmax - Vmin}\right)$
Distancia a fallas sísmicas	Coseno	$\cos\left(\frac{\pi}{2} * \frac{Vo - Vmin}{Vmax - Vmin}\right)$

Las ecuaciones presentadas, se han calculado en el software ArcMap a través de la herramienta “Raster Calculator”, cuya aplicación es similar a una fórmula matemática, como se muestra en la Figura 58.

**Figura 58**

*Herramienta usada para la asignación de valores difusos*

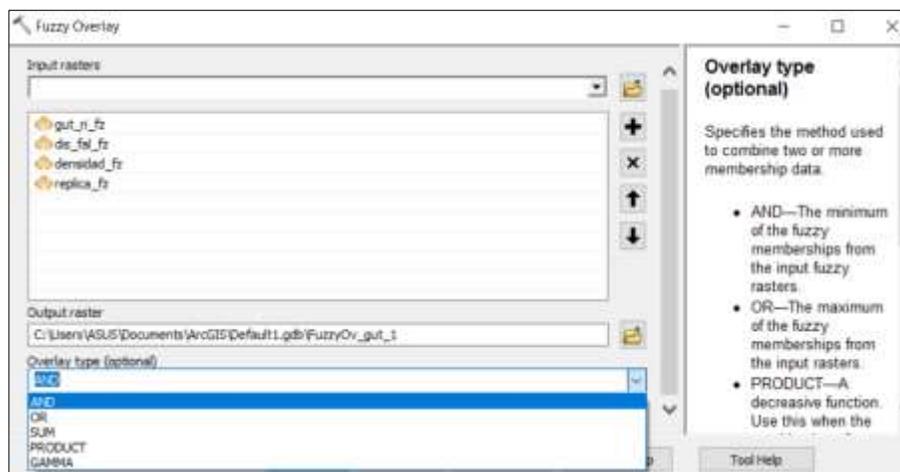


### **Superposición Difusa**

Posterior a la asignación de valores Fuzzy a través de las funciones de pertenencia, se ha realizado un proceso conocido como superposición, el cual es muy similar a un Álgebra de mapas, para así obtener las zonas con una mayor posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud; el software ArcMap en versiones recientes brinda una herramienta denominada “Fuzzy Overlay” que permite de una manera más simplificada, realizarlo, como se visualiza en la Figura 59.

**Figura 59**

*Herramienta usada para la Superposición Fuzzy o Difusa*



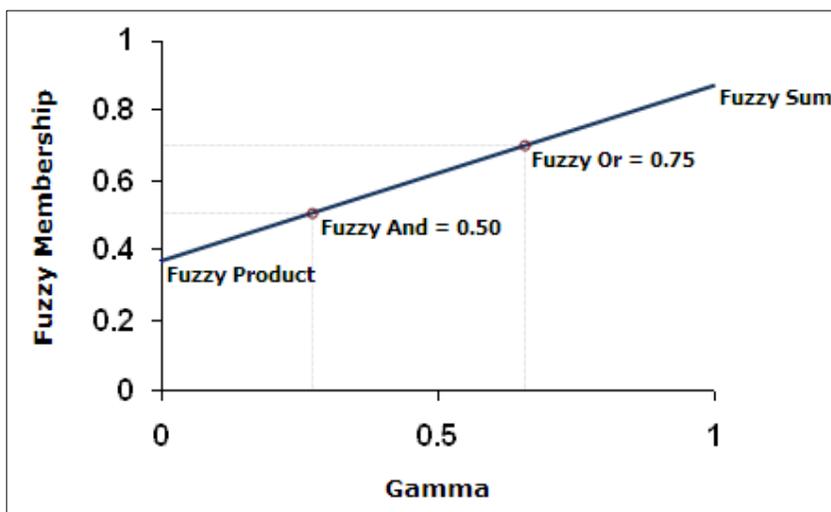
A diferencia del Álgebra de mapas, en el que generalmente se usa el producto de variables, la herramienta descrita por Esri (s.f) muestra 5 opciones para la

superposición: AND (que enfatiza encontrar los valores mínimos del conjunto de variables), OR (que prioriza encontrar los valores máximos de al menos una variable del conjunto), PRODUCT (que realiza el mismo proceso que una multiplicación de variables), SUM (que realiza la sumatoria de los valores del conjunto de variables) y GAMMA (en el que se realiza un producto entre PRODUCT y SUM, elevados a una potencia llamada del mismo nombre).

Por su funcionalidad y su mejor especificidad a la hora de combinar varios subproductos dentro de un producto final, se ha usado la opción GAMMA, por lo que, como paso posterior, se ha elegido la potencia correspondiente. A manera de guía se presenta la Figura 60 donde se muestra la relación existente entre el valor de la potencia a cada una de las opciones de superposición mencionadas; para esta investigación se ha considerado un valor de 0,9.

**Figura 60**

*Relación entre tipos de Superposición Difusa y el exponente Gamma*



*Nota.* Tomado de Esri (s.f)

Con ambas metodologías realizadas, se ha procedido a la confección de varios productos cartográficos, estadísticos comparativos y análisis adicionales para que complementen y apoyen los resultados obtenidos.

## Capítulo IV

### Resultados

En este apartado se describen, de manera detallada, los productos obtenidos que se han descrito en el capítulo anterior, todo ello guardando concordancia a los objetivos específicos y metas de la investigación planteados previamente. En dichos productos se muestran las zonas de alerta en las que podrían ocurrir un evento sísmico de gran magnitud en el territorio ecuatoriano, junto a diferentes análisis realizados.

#### Catálogo sísmico del proyecto

El producto resultante de los procesos llevados a cabo en el anterior capítulo, se muestran en la Figura 61, obteniendo un total de 4182 eventos sísmicos, además el 96,9% del total de sismos del catálogo se encuentran entre las magnitudes de 4,0 a 6,0 Mw. Otros estadísticos adicionales referentes al catálogo sísmico del proyecto y el porcentaje de eventos sísmicos presentes por magnitud en el mismo se presentan en la Tabla 17 y Tabla 18, respectivamente.

Otra característica importante a destacar, radica en que doce terremotos equivalentes al 40% de los sismos con magnitud mayor o igual a 7,0 Mw (que han generado grandes afectaciones a lo largo de la historia en el territorio ecuatoriano) se encuentran ubicados en la Costa, mientras que el 60% restantes (ubicados en la Sierra y Oriente) son los más antiguos ocurridos dentro de la zona de estudio, salvo la excepción del sismo ocurrido en la provincia de Pastaza en 2019.

**Tabla 17**

*Estadísticos y relaciones calculadas para el catálogo sísmico del proyecto*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Número total de sismos</b>	4182
<b>Fecha de inicio</b> (año/mes/día hora:min:seg)	1587/8/31 01:30:00
<b>Fecha final</b> (año/mes/día hora:min:seg)	2020/7/25 21:16:20
<b>Magnitud mínima (Mw)</b>	4,0

Característica	Valor
Magnitud máxima (Mw)	8,8
Valor "a" de la relación Gutenberg-Richter	6,62
Valor "b" de la relación Gutenberg-Richter	3,983 (anual)
Ecuación de Relación Gutenberg-Richter	log N=6,62-0,74*m log N=3,983-0,74*m (anual)

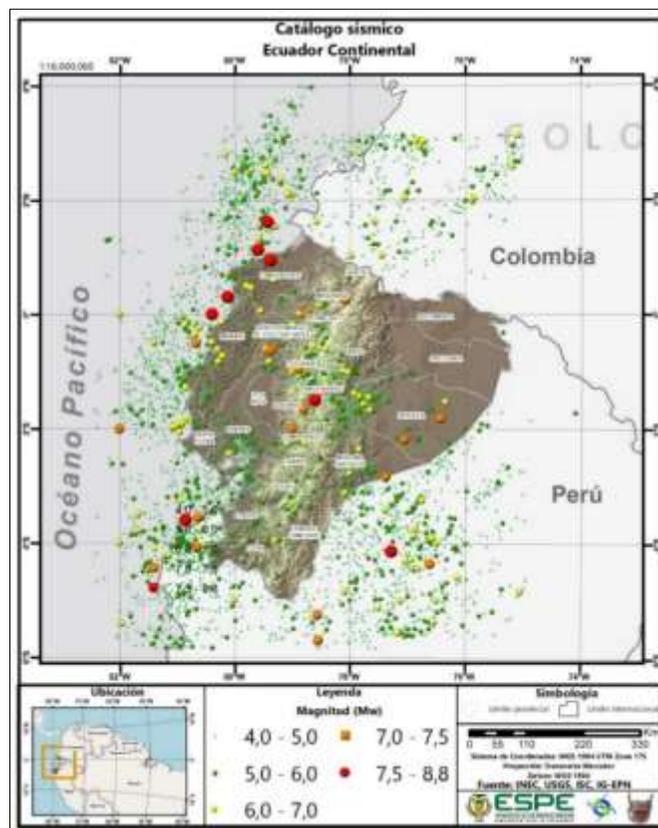
**Tabla 18**

*Porcentaje de sismos existentes por magnitud en el catálogo sísmico del proyecto*

Magnitud (Mw)	Porcentaje de sismos (%)
4,0-4,5	52,77
4,5-5,0	32,09
5,0-5,5	8,78
5,5-6,0	3,32
6,0-6,5	1,58
6,5-7,0	0,88
7,0-7,5	0,43
7,5-8,8	0,14

**Figura 61**

*Catálogo sísmico del proyecto*



### ***Análisis de completitud***

En aspectos generales, el catálogo sísmico del presente proyecto muestra una completitud temporal que data del año 1963, mientras que, al hablar de la magnitud de completitud se muestra un valor correspondiente a 4,3 Mw. Todos estos valores fueron determinados según se ha descrito en el capítulo anterior y cuyos resultados se muestran en el Anexo 2

A manera de resumen y para mejor comprensión de lo mostrado anteriormente, en la Tabla 19 se muestran la temporalidad específica en la que cada intervalo de magnitud se considera como completo. Para ello, se ha considerado el último registro sísmico que se encuentre dentro del rango temporal identificado como completo para cada intervalo.

**Tabla 19**

*Completitud de los intervalos de magnitud para el catálogo sísmico del proyecto*

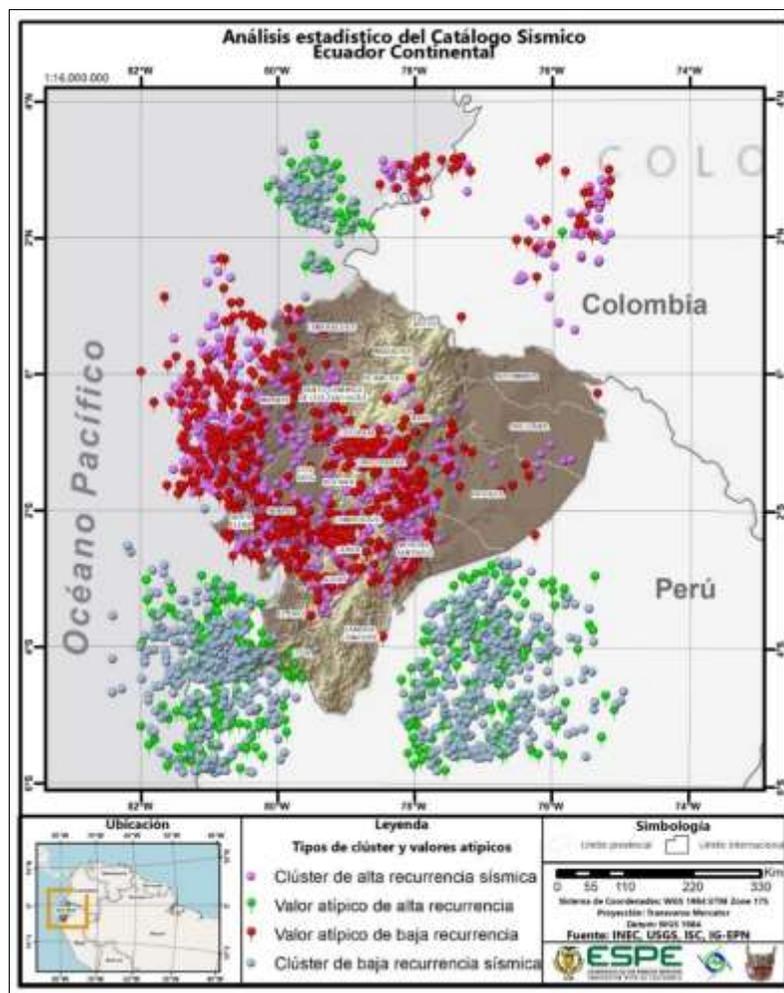
<b>Intervalo de magnitud (Mw)</b>	<b>Año de completitud</b>
4,0-4,5	1963
4,5-5,0	1963
5,0-5,5	1933
5,5-6,0	1920
6,0-6,5	1911
6,5-7,0	1917
7,0 <	1901

### ***Análisis inicial complementario***

Se ha optado por realizar un análisis que involucre a la Relación Gutenberg-Richter de manera geoespacial, para así visualizar la presencia o ausencia de clústeres o valores atípicos dentro del catálogo sísmico del proyecto y, con ello representar zonas sísmicas importantes. Dicho análisis fue realizado a través del estadístico de I Anselin local de Morán y cuyo resultado se muestra en la Figura 62.

Figura 62

*Análisis inicial estadístico para el catálogo sísmico del proyecto*



Los clústeres identificados con una alta recurrencia sísmica indican que en dichas zonas ocurren sismos de baja magnitud (<5 Mw), mientras que, los señalados con baja recurrencia sísmica muestran lugares donde ocurren sismos de magnitud considerable (>5 Mw). Por otro lado, cuando se habla de un valor atípico de alta recurrencia, se refiere a que existen muy pocos sismos de baja magnitud en una zona donde principalmente ocurren sismos de magnitud considerable y, si se tiene un valor atípico de baja recurrencia, muestra que en una zona donde ocurren sismos de baja

magnitud, también han ocurrido sismos de magnitud considerable, pero en menor número.

Se debe señalar también que, en las zonas que no se muestra una representación de clúster o valor atípico, si se tienen registros de eventos sísmicos pero su correlación espacial con la recurrencia sísmica, no ha reflejado valores significativos dentro del análisis considerado.

### **Aplicación del Algoritmo M8**

#### ***Parámetros idóneos para el algoritmo M8 en la zona de estudio***

Como se muestra a continuación en la Tabla 20 se describen todos los parámetros usados para aplicación prospectiva del Algoritmo M8, según lo describe el software usado, adicionalmente se han descrito ciertas observaciones en caso que, se desee realizar futuros análisis y generar diferentes resultados.

**Tabla 20**

*Parámetros determinados como idóneos para el proyecto*

<b>Parámetro (Traducido al español)</b>	<b>Valor</b>	<b>Observación</b>	
<b>Temporalidad del catálogo sísmico</b>	22 años	Temporalidad mínima para el cálculo del algoritmo	
<b>CI</b>	<b>Beta(<math>\beta</math>)</b>	1,25	Modificable, a criterio del investigador
	<b>Radio (Km)</b>	337	Modificable, según el valor de $\beta$
	<b>Magnitud Objetivo (Mw)</b>	7,0	Modificable, a criterio del investigador
	<b>Límite de eventos sísmicos</b>	3-6	Modificable, según zona de estudio
<b>Fecha inicial en cálculo del algoritmo</b>	1/7/1963	Modificable, según datos del catálogo sísmico	
<b>Fecha final en cálculo del algoritmo</b>	31/7/2020	Modificable, según datos del catálogo sísmico	
<b>Años consecutivos para el cálculo de las series (semestral)</b>	12 (6 años)	Parámetro por defecto, no se evidencian cambios significativos en su modificación	
<b>Tiempo para suavizado del cálculo de las series (semestral)</b>	6 (3 años)	Parámetro por defecto, no se evidencian cambios significativos en su modificación	
<b>Duración de la alerta (semestral)</b>	10 (5 años)	Modificable, a criterio del investigador	

Como se puede observar, el Algoritmo M8 muestra parámetros que pueden variar (principalmente los vinculados al catálogo sísmico o a la zona de estudio) aunque,

existen otros parámetros que fueron identificados a través de revisiones bibliográficas, como lo es el referente a la temporalidad del catálogo sísmico. Sin embargo, los parámetros usados por defecto, pese a que se ha consultado varias investigaciones, no se muestran como valores modificables o, en su defecto, han concluido que un cambio en dichos parámetros no refleja una variación importante en el resultado final del algoritmo.

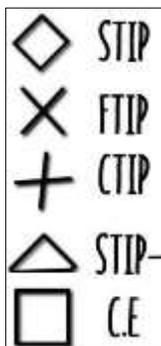
### ***Análisis prospectivo en cada CI***

Dado el tamaño del CI propuesto para la investigación, se han obtenido un total de 10 elementos que abarcan toda la zona de estudio, por lo que a continuación se procede a describir los hallazgos realizados en cada uno de ellos y, con ello la declaración o no de una alerta para un sismo de magnitud mayor o igual a 7,0 Mw.

A manera de preámbulo y para mejor entendimiento, en la Figura 63 se muestra la simbología usada para las series de tiempo y sus tipos de TIPs identificados en la misma (mostrados en el capítulo anterior).

### **Figura 63**

*Simbología usada en las series de tiempo*



**CI #1.** Según lo mostrado en el Anexo 3, se puede evidenciar la presencia de un TIP continuo (CTIP) con una tendencia al aumento en todas las series calculadas, adicionalmente existen 2 TIPs de tipo c.e, que corresponden a sismos de gran magnitud ocurridos en los años 2016 y 2019. Por otro lado, se muestra una serie de FTIP entre

los años 1985 y 1995, dado que en este período de tiempo han ocurrido sismos de magnitud cercana a la magnitud objetivo de esta investigación.

Por la presencia de un CTIP y la tendencia, descritas con anterioridad, este CI es declarado con alerta de ocurrencia de un sismo de magnitud objetivo (mayor o igual a 7,0 Mw).

**CI #2.** Como se muestra en el Anexo 4, existen tanto los STIP y c.e declarados en el anterior CI, así como la tendencia al aumento y el CTIP en el último punto de las series de tiempo, por lo que (al igual que el anterior CI), se declara una alerta por los TIPs encontrados.

Cabe destacar que, este CI difiere del primero, ya que no muestra la presencia de FTIPs dentro del período 1985-1995.

**CI #3.** En este CI, mostrado en el Anexo 5 se ha encontrado un c.e, como último elemento identificado dentro de las series de tiempo, además (como en los anteriores CI), se evidencia la presencia de otro c.e correspondiente al sismo ocurrido en 2019, pero se puede visualizar los sucesivos FTIPs en la temporalidad señalada en los CI anteriores, salvo que, en esta se muestran variaciones porque se señalan algunos STIP en el mismo período (que corresponde de manera más cercana a lo que descrito en el catálogo sísmico del proyecto).

Por lo descrito anteriormente, en el presente CI no se declara con alerta alguna.

**CI #4.** Según lo mostrado en el Anexo 6, se identifica un CTIP en el tramo final de las series calculadas, sin embargo, al analizar la tendencia de dichas series, se puede visualizar una disminución en la actividad sísmica, por lo que, en este CI no se declara alerta pese a la presencia del TIP anteriormente mencionado. Por otro lado, también se muestra los consecutivos FTIP, en la misma época que aparecen en los anteriores CI.

**CI #5.** Este CI, según se visualiza en el Anexo 7, muestra un comportamiento similar al CI #3, donde se ha identificado un c.e en el último tramo de las series de tiempo y el conjunto sucesivo de FTIP con pequeños indicadores de STIP-, por lo que, no se ha declarado a esta zona con una alerta.

**CI #6.** Según se muestra en el Anexo 8, se ha identificado un CTIP en el último tramo de las series de tiempo, además se evidencia una acumulación de CTIP en períodos anteriores, pero según la tendencia existente, se podría deducir que estos TIPs puedan convertirse en FTIP, por lo que, este CI no se considera como zona de alerta.

**CI #7.** Este CI muestra TIPs similares a los mostrados en el CI #2, incluyendo la presencia de un CTIP en el último punto de las series de tiempo, pero al revisar la tendencia de dichas series, se evidencia una disminución en la actividad sísmica, determinando que en este CI no se declare alerta de ocurrencia sísmica. Lo anterior mencionado se puede ver en el Anexo 9.

**CI #8.** Según lo mostrado en el Anexo 10, se visualiza un comportamiento similar al anterior CI incluyendo su tendencia a la disminución de la actividad sísmica, por lo tanto, pese a identificarse un CTIP en el último punto de la serie de tiempo, no se declara alerta para este CI.

**CI #9.** Como se muestra en el Anexo 11, este CI tiene identificados similares TIPs a los encontrados en el CI #1, incluyendo su tendencia ascendente y su CTIP en el último punto de las series de tiempo, por lo tanto, se declara una alerta ante la posible ocurrencia de un sismo de magnitud objetivo en la zona.

**CI #10.** Por lo mostrado en el Anexo 12, se puede identificar que este CI tiene un comportamiento similar al CI #8, pero su diferencia radica en el número de TIPs identificados (es menor en relación al CI #8). Aunque se visualice un CTIP en el último

punto de las series de tiempo, su tendencia indica una disminución, por ende, no se declara una alerta para la zona que abarca este CI.

### ***Área de alerta generada***

A manera de resumen, se presenta la Tabla 21 en la que se describen los CI de investigación usados en este proyecto junto a su resultado generado por el Algoritmo M8.

**Tabla 21**

*Resumen de los resultados encontrados en cada CI*

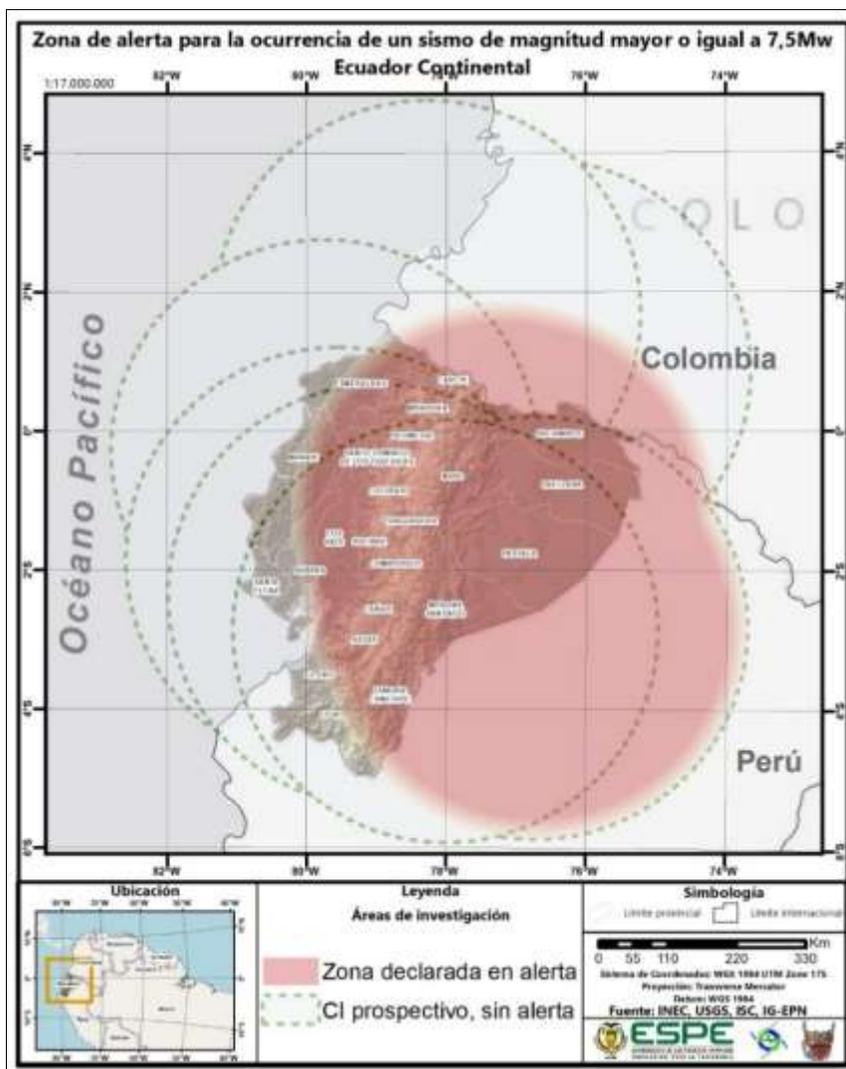
<b>Número de CI</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Resultado</b>
1	-77,0505	-2,1862	CTIP declarado (Alerta declarada)
2	-77,181	-1,178	CTIP declarado (Alerta declarada)
3	-77,2471	0,8395	c.e, TIP generado por sismos en 2019 (No se declara alerta)
4	-76,6965	0,8784	CTIP con tendencia a la baja (No se declara alerta)
5	-78,2706	1,7181	c.e, TIP generado por sismos en 2019 (No se declara alerta)
6	-79,7535	-0,2911	CTIP con tendencia a la baja (No se declara alerta)
7	-79,5443	-1,8407	CTIP con tendencia a la baja (No se declara alerta)
8	-78,9469	-2,3724	CTIP con tendencia a la baja (No se declara alerta)
9	-76,7388	-2,8356	CTIP declarado (Alerta declarada)
10	-78,0172	-2,8834	CTIP con tendencia a la baja (No se declara alerta)

Por lo anterior descrito, en la Figura 64 se muestra la espacialización del resultado de la aplicación prospectiva del Algoritmo M8, donde se visualiza el área de alerta conformada por 3 CI, en la que consta principalmente las regiones Sierra y Oriente del territorio ecuatoriano, incluyendo parte de las provincias de Esmeraldas, Manabí y Guayas.

Otro punto importante a resaltar, radica en que la costa ecuatoriana no muestra una alerta de ocurrencia sísmica, esto puede deberse a que en años recientes ya ha ocurrido un sismo de gran magnitud (16 de abril del 2016) y, por lo tanto, los TIPs identificados, se deben a la actividad sísmica posterior a dicho terremoto, hasta que se retome la normalidad (en cuestión a la sismicidad de la zona).

Figura 64

Zona de alerta por la ocurrencia de un terremoto calculada a través del Algoritmo M8



### ***Propuesta para la optimización de la zona de alerta a través de herramientas geoespaciales***

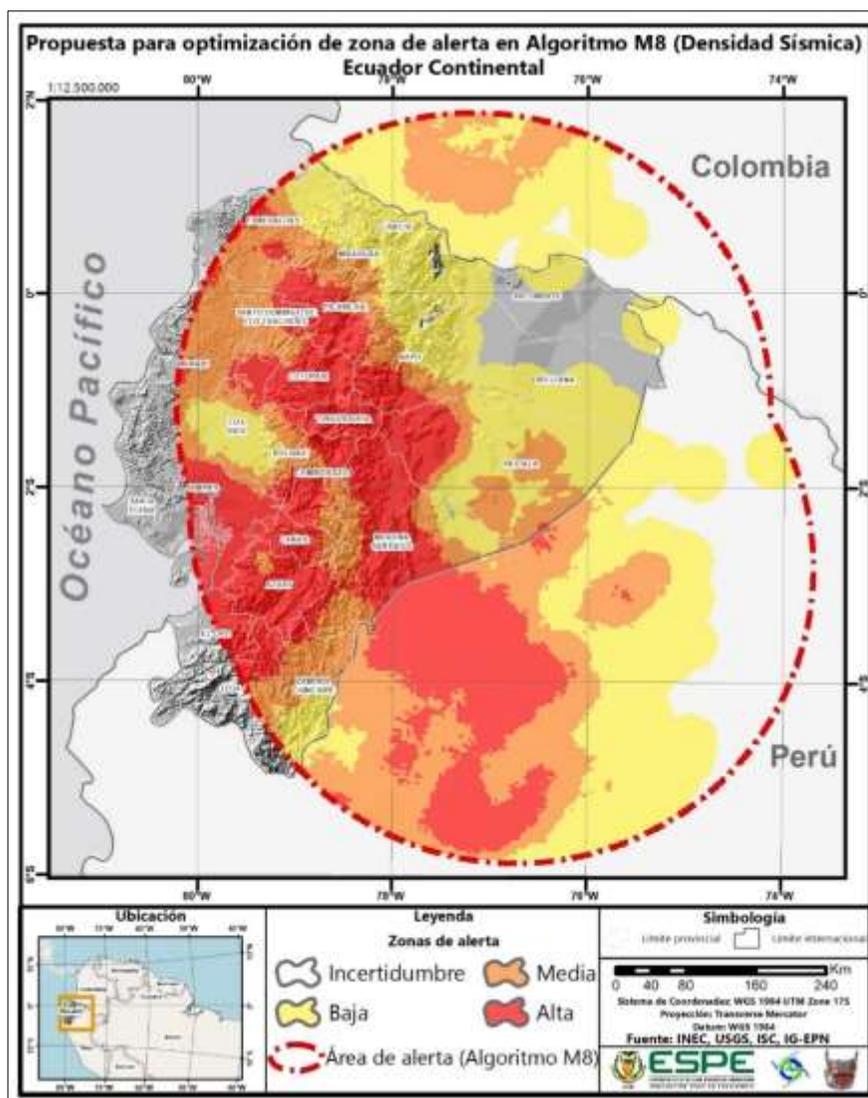
A través de la densidad sísmica calculada en el anterior capítulo, se ha logrado obtener zonas en las que, según el número de eventos sísmicos ocurridos en las mismas, se puede brindar rangos de alerta sean estas de tipo baja, media o alta.

Según lo mostrado en la Figura 65, las provincias que tienen la máxima alerta son: Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua y Morona Santiago. En contraste con lo anterior,

existe también una zona llamada de incertidumbre, en la que, no se ha registrado actividad sísmica considerable dentro de la densidad sísmica, por lo que, a pesar que no poseen algún tipo de alerta, tampoco existen argumentos con que se pueda descartar por completa la ocurrencia de un sismo de magnitud objetivo dentro de la misma.

**Figura 65**

*Optimización de la zona de alerta a través de herramientas geoespaciales*



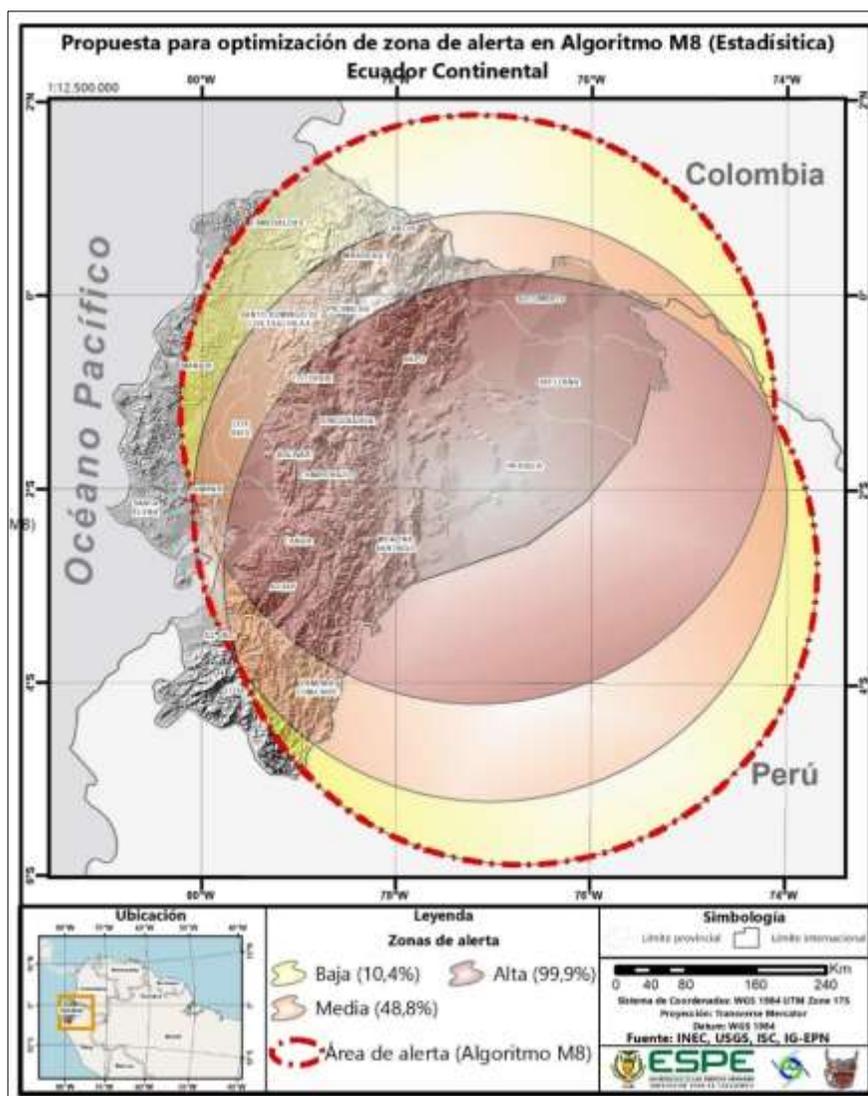
### ***Propuesta para la optimización de la zona de alerta a través de Estadística***

Como se muestra en la Figura 66, se han identificado 3 zonas con probabilidad de ocurrencia sísmica; la mayor probabilidad se ubica principalmente en la mayoría del Oriente ecuatoriano y parte de la Sierra Centro, incluyendo una pequeña porción de la Provincia de Pichincha y parte de la provincia del Guayas.

En comparación con la anterior optimización, esta no muestra una zona de incertidumbre, pero sus valores no son continuos dentro de la zona de estudio.

### **Figura 66**

*Optimización de la zona de alerta a través de Estadística*

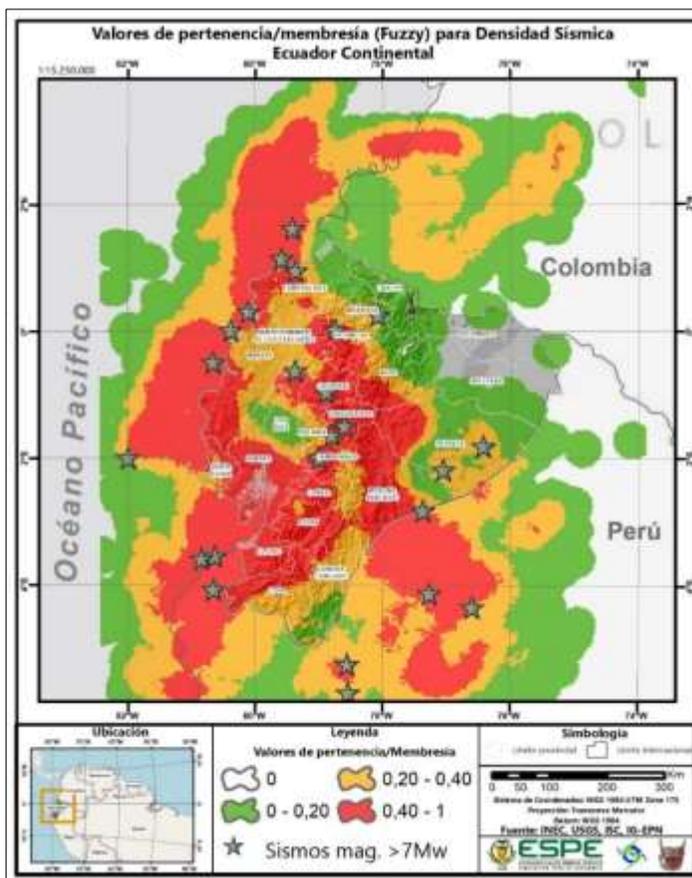


## Aplicación de Lógica Difusa

Antes de obtener un producto cartográfico a través de esta metodología, se ha realizado el cálculo de los valores de membresía o de pertenencia a cada una de las variables involucradas en el mismo. Como se muestra en la Figura 67 se han especializado los valores correspondientes a la variable Densidad sísmica y que, comparadas con la ubicación de los sismos de magnitud mayor a 7,0 Mw, se comprueba la correlación de éstos con las zonas de mayor valor de pertenencia.

**Figura 67**

*Valores de pertenencia para Densidad Sísmica*

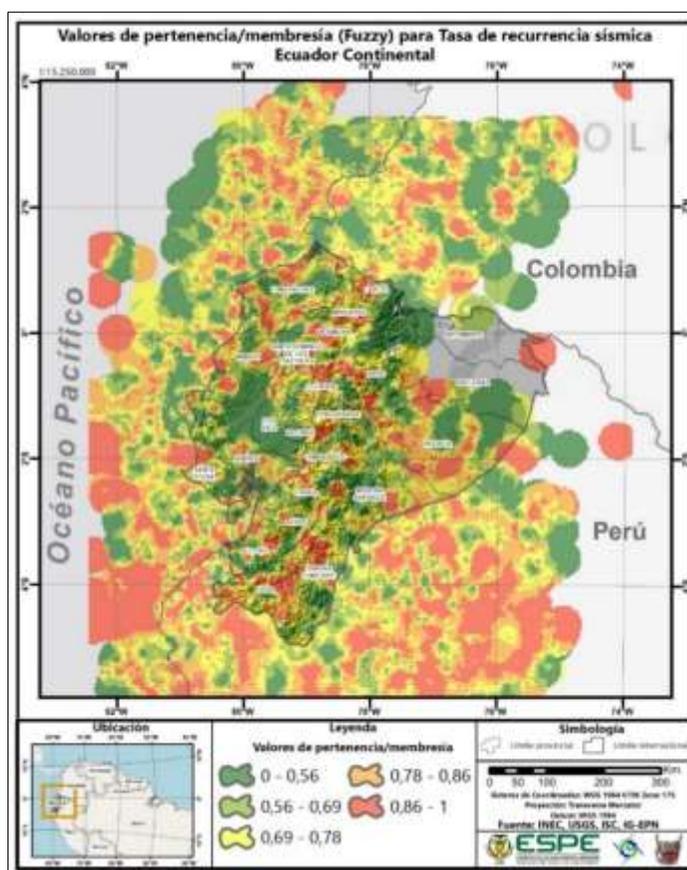


Para la variable que muestra la tasa de recurrencia sísmica, se evidencia la similitud del resultado con el análisis inicial de clústeres y valores atípicos, adicionalmente, como se ha usado la función coseno, se puede visualizar la

concordancia entre el máximo valor con la ubicación de las zonas de ocurrencia de sismos de gran magnitud (considerando inicialmente que, los valores mínimos de la variable muestran esa correlación). Lo anterior descrito se puede visualizar en la Figura 68.

### Figura 68

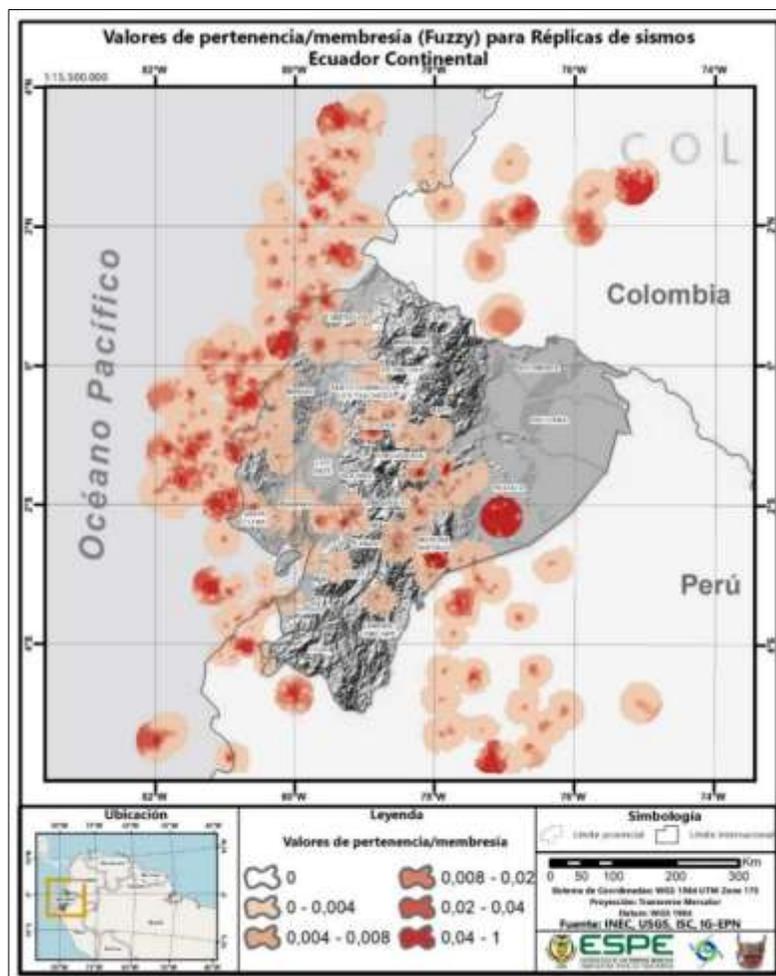
*Valores de pertenencia para Tasa de recurrencia sísmica*



En cuestión a la variable de réplicas relacionadas a sismos principales, se puede evidenciar zonas que poseen un valor de cero (0) que representa la no pertenencia hacia la respuesta que se busca con la variable, pero, cabe resaltar que no se descarta por completo dentro de la metodología planteada, como se puede observar en la Figura 69.

Figura 69

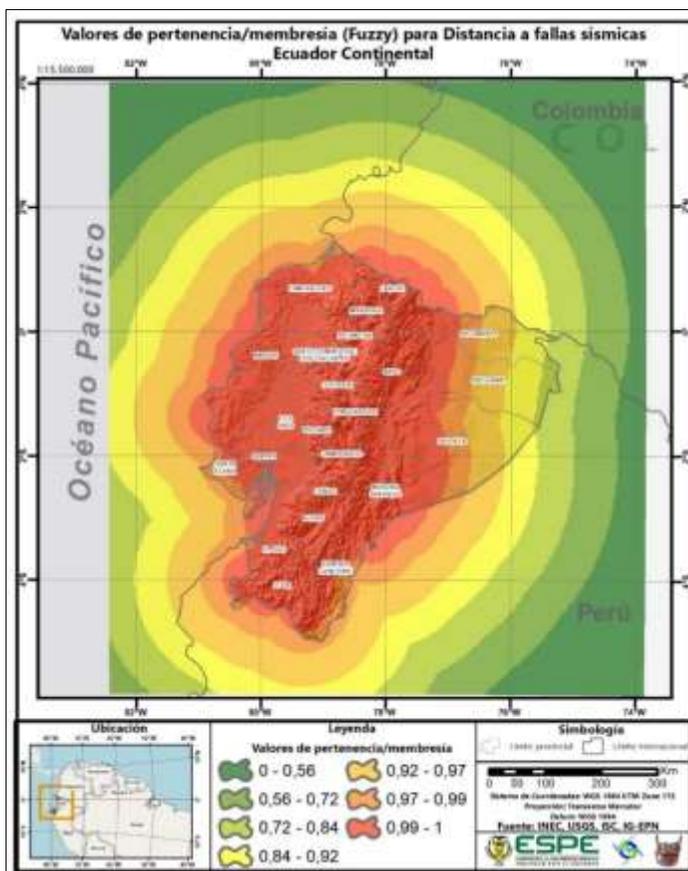
Valores de pertenencia para Réplicas sísmicas



Según lo mostrado en la Figura 70, se puede identificar que, al usar a la distancia como factor dentro de la construcción de la continuidad de la variable, puede genera valores en toda la extensión de la zona de estudio, esto puede ser un factor importante a considerar a la hora de ampliar o reducir el sitio de investigación en futuros proyectos.

**Figura 70**

*Valores de pertenencia para Distancia a fallas sísmicas*



### **Zonas de alerta generadas**

En la Figura 71, se muestran las posibles zonas de alerta ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, aclarando que no se puede especificar un grado de asociación perfecta hacia la determinación del fenómeno debido a que, el objetivo principal de la Lógica Difusa es mostrar el grado de posibilidad de la ocurrencia.

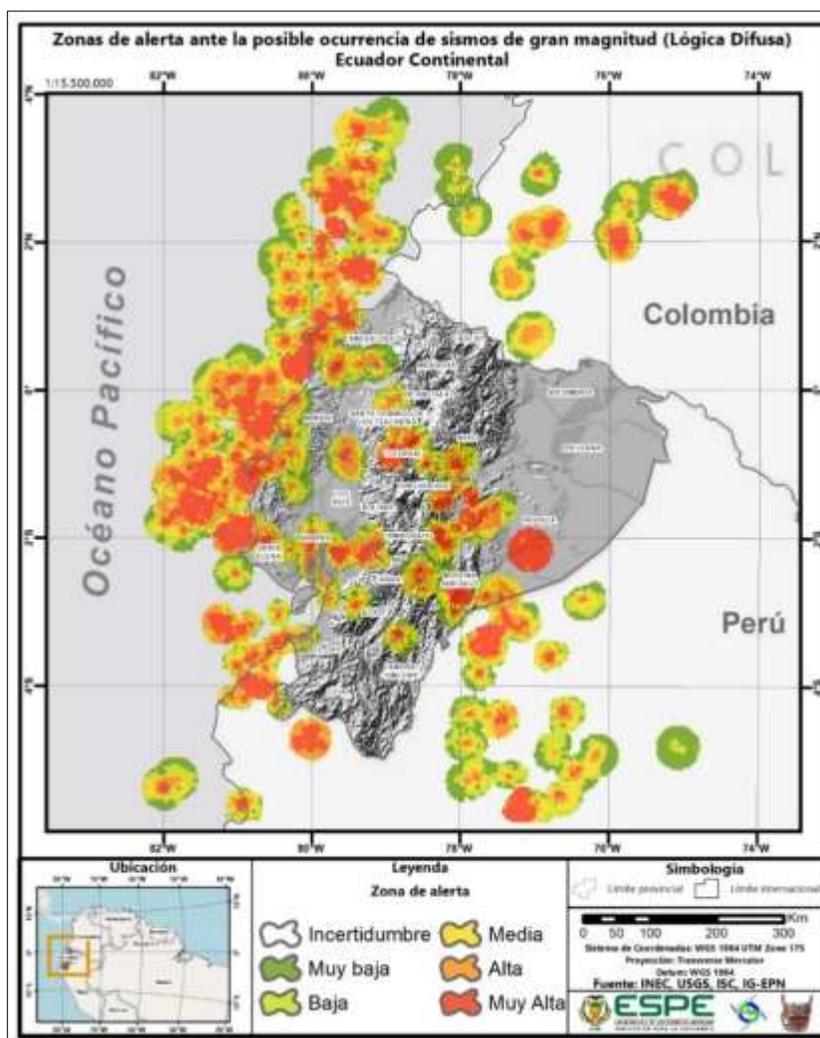
Una limitación para esta metodología es la imprecisión existente en territorio colombiano y peruano, dado que, la variable correspondiente a distancia hacia fallas sísmicas no contiene elementos de dichos países, pese a que genere un valor de pertenencia, no debería ser considerado como totalmente verídico.

Un punto destacable en la metodología de Lógica Difusa, es su delimitación para las zonas de alerta ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud dentro del territorio ecuatoriano, mostrando concordancia con el Algoritmo M8, dado que la zona oriental se muestra con un nivel muy alto de alerta.

Por el contrario, y a diferencia con el Algoritmo M8, la costa ecuatoriana figura principalmente como una alerta de nivel muy alta, situación que es descartada por los cálculos de dicho algoritmo, esto último puede deberse a la actividad sísmica reciente dentro de dicha zona.

### Figura 71

*Zonas de alerta definidas por Lógica Difusa*



## Comparativa entre ambas metodologías

Como se ha podido observar a lo largo de la investigación, ambas metodologías tienen marcadas diferencias, la principal radica en que el Algoritmo M8 muestra resultados más precisos, en cuestiones de temporalidad y magnitud objetivo a analizar, mientras que la Lógica Difusa depende principalmente de las variables de entrada para su especificidad.

Por otro lado, la principal ventaja que tiene la Lógica Difusa es su forma más apreciable de visualizar las zonas de alerta, dado que el Algoritmo M8 muestra áreas extensas circulares de alerta. Además, que su aplicación y cálculo tienen una mayor facilidad dado que no se requiere de un software adicional que realice procesos adicionales, como es el caso del Algoritmo M8, el cual no brinda una representación cartográfica de sus resultados.

En la Tabla 22 se muestra las comparativas realizadas entre ambas metodologías, según criterios que van desde su principio, hasta su aplicabilidad en Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.).

**Tabla 22**

*Comparaciones entre el Algoritmo M8 y Lógica Difusa*

Aspectos a comparar	Algoritmo M8	Lógica Difusa
<b>País/Año de creación</b>	Rusia/1986	E.E.U.U/1965
<b>Área o campo para el que fueron creados inicialmente</b>	Sismología-Patrones sísmicos	Matemática/Software
<b>Principio o fundamento</b>	Evaluación de actividad sísmica predecesora temporal y espacial para la determinación de un TIP (Identificación PSP)	Analizar el grado de pertenencia de cada variable a un conjunto difuso, para su posterior sobreposición.
<b>Tipo de información para su aplicación</b>	Catálogo sísmico depurado y homogenizado (Si se desea realizar una mejora, se requerirá de información adicional)	Información geoespacial en diferentes formatos, referente a sismicidad o variables asociadas a la misma
<b>Parámetros</b>	*Temporalidad *CI *Magnitud objetivo *Límite de eventos sísmicos *Duración de la alerta	*Funciones de pertenencia/membresía *Forma de sobreposición

<b>Aspectos a comparar</b>	<b>Algoritmo M8</b>	<b>Lógica Difusa</b>
<b>¿Permite análisis retrospectivos?</b>	Sí	Sí
<b>¿Permite análisis prospectivos?</b>	Sí	No (Requiere de metodologías adicionales)
<b>Tipo de resultados</b>	7 series de tiempo por cada CI	Datos continuos en la zona de estudio (tipo ráster)
<b>¿Es fácilmente replicable?</b>	Si, requiere de conocimientos previos sobre TIP (Sismología)	Sí, requiere conocimientos previos de SIG y Lógica Fuzzy
<b>Hardware</b>	Especificaciones de tipo medio, por el volumen de información	Especificaciones de tipo medio, por el volumen de información y geoprocesos adicionales
<b>Software</b>	*Rstudio, junto a varios paquetes adicionales dentro del mismo programa *Software de programación (desarrollo de programa personal)	Software GIS
<b>Adaptabilidad a ambientes SIG</b>	Baja, requiere programación avanzada	Alta, puede ser usada en diferentes plataformas de geoinformación

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

En este proyecto de investigación se ha logrado obtener a través de 2 metodologías, zonas de alerta ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el territorio ecuatoriano, ambas fueron comparadas a través de una tabla cualitativa, por lo tanto, los objetivos y metas planteados inicialmente, fueron cumplidos a cabalidad.

Por todos los resultados obtenidos, se ha aceptado la hipótesis nula del proyecto de investigación, la cual indica que si se puede modelar la estimación de ocurrencia de sismos de gran magnitud en el territorio ecuatoriano por ambas metodologías.

El proceso de fusionar catálogos sísmicos aporta de manera sustancial a la confección de un catálogo sísmico más completo, por lo que es un artificio importante a la hora de recolectar registros sísmicos de una zona determinada, principalmente en lugares donde se tenga dificultad de conseguir información sísmica.

El catálogo sísmico del proyecto consta de un total de 4182 registros sísmicos correspondientes a una completitud de 57 años desde el año 1963 con una magnitud de completitud de 4,3 Mw, cuyo último sismo data del 25 de julio del año 2020. Además, cabe destacar que los terremotos con magnitud mayor a 7,0 Mw describen una completitud con referencia al año 1901, esto debido a su baja recurrencia sísmica dentro del territorio ecuatoriano.

El Algoritmo M8 es una metodología que aporta de manera importante a la determinación a mediano plazo (5 años) de la zona ante una posible ocurrencia de un sismo de magnitud 7,0 Mw, mostrando principalmente a la Región Sierra y Oriente como posible epicentro de dicho evento, pero al ser una zona muy amplia, las diferentes optimizaciones realizadas pueden brindar una mejora significativa a la hora de identificar el área de ocurrencia.

Al comparar las optimizaciones realizadas al Algoritmo M8, las zonas que coinciden con un tipo de alerta alta corresponden a las provincias de Morona Santiago, Tungurahua, Pichincha, Cotopaxi, Cañar y Azuay. Adicionalmente se debe considerar que, a excepción de las últimas 2 enunciadas anteriormente, todas las provincias con una alerta de alta probabilidad, han registrado por lo menos un sismo de magnitud 7,0 Mw o superior en el siglo XX, por ende, se esperaría que el fenómeno sísmico volviese a ocurrir dentro de los sitios mencionados.

La Lógica Difusa aporta a una mejor ubicación de las zonas expuestas a una mayor posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud, además por su versatilidad puede ser usado en diferentes softwares SIG. Otra ventaja importante radica en que puede incluir a más variables dentro del análisis, con ello puede mejorar el producto resultante. Por su funcionalidad, esta metodología por sí sola no puede brindar resultados prospectivos dado que realiza una sobreposición de las variables con sus respectivos valores de pertenencia o membresía a una temporalidad específica.

Por la condición que imposibilita realizar un análisis de tipo prospectivo, se concluye que la Lógica Difusa (por sí sola), no puede reemplazar al Algoritmo M8, como metodología de predicción sísmica, sin embargo, por su gran funcionalidad a la hora de encontrar lugares específicos, se puede deducir que ambas metodologías son complementarias, es decir, la Lógica Difusa puede ser una forma de optimización de las zonas de alerta declaradas por el Algoritmo M8 y, con ello, brindar una mejor respuesta en la estimación estadística de la ocurrencia de sismos de gran magnitud.

La estimación de una posible ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud a mediano plazo, en cualquiera de sus metodologías, debería ser usada como una herramienta para la planificación y gestión de riesgos, dado que puede brindar un panorama a corto plazo para que las diferentes autoridades tomen cartas en el asunto y

puedan realizar proyectos que prevengan los efectos adversos que provoca este fenómeno.

### **Recomendaciones**

Se recomienda el uso de una computadora con especificaciones de gama media o alta, dado que, tanto el catálogo sísmico, sus diferentes operaciones y geoprosos adicionales, requieren de elementos como procesador, memoria RAM y (en medida de lo posible) un disco duro de estado sólido, para que se pueda obtener una fluidez adecuada para cada una de las acciones mencionadas anteriormente.

A la hora de realizar un catálogo sísmico, se recomienda, en primera instancia, la búsqueda de información sísmica de diversas fuentes o agencias para su posterior fusión. Este último proceso es recomendado realizarlo 1 a 1, es decir, fusionando cada fuente con otra sin combinarlas todas a la vez, todo ello permite una mejor depuración de elementos coincidentes o duplicados.

Se recomienda el uso de nuevas plataformas para el desarrollo de los datos que no tengan una representación cartográfica, en específico, se podría usar el software ArcGIS Pro junto a una herramienta que permita enlazar los resultados obtenidos a través de RStudio, con ello, se brinda un aporte a la mejora de las Tecnologías Geoespaciales.

Como futuras líneas de investigación, se recomienda la aplicación del Algoritmo M8-Msc, el cual es una optimización creada por los autores en años recientes, además que, se podría realizar una aplicación de dicho algoritmo en tiempo real, así se podría obtener resultados que se asemejan de mejor manera a la actividad sísmica actual. Adicionalmente, se recomienda realizar un análisis prospectivo usando las variables calculadas a través de la Lógica Difusa con la aplicación de Inteligencia Artificial o Redes Neuronales.

### Referencias Bibliográficas

- Abe, K. (1981). Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Phys. Earth Planet*, 72-92.
- Abe, K. (1984). Complements to "Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Phys. Earth Planet*, 17-23.
- Acosta, A., Guerrero, D., León, R., Oña, P., Cruz, M., & Toulkeridis, T. (2016). Calificación y Cuantificación de fallas geológicas en el Distrito Metropolitano de Quito. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 35-42.
- Andocilla, L. (2012). *Implementación del Algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas-Ferrovial-La Magdalena-Itchimbía del Distrito Metropolitano de Quito*. Sangolquí: Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica del Ejército.
- Arroyo, M., Godínez, K., & Linkimer, L. (2017). Completitud del catálogo de la red sísmológica nacional de Costa Rica durante 1975-2014. *Boletín de Geología*, 39(3), 87-98.
- Astorga, A. (2012). *El problema sísmico*. Mérida: Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos.
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, H., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., . . . Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 773-786.
- Benito, M., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., . . . Torres, Y. (2010). *Amenaza sísmica en América Central*. Madrid: Entinema.
- Bone, C., Reyes, D., Tierra, A., & Cruz, M. (2017). Análisis espacial, geológico, geomorfológico e hídrico para la asignación de los valores de velocidad del campo de velocidades VEC-EC. *Boletín Informativo No. 22-Simposio SIRGAS 2017* (págs. 30-35). Mendoza, Argentina: SIRGAS.

Bonelli, J., & Carrasco, L. (1957). El sismo de foco profundo de 29 de marzo de 1954 en la falla de Motril. *Revista Geofísica*, 113-139.

British Geological Survey. (s.f.). *Locating earthquakes, datalogging and software*.

Recuperado el 02 de Julio de 2020, de

<https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/locatingQuakes.html>

British Geological Survey. (s.f.). *Locating earthquakes, datalogging and software* .

Obtenido de

<https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/locatingQuakes.html>

Brownrigg, R. (2005). Using R for Statistical Seismology. *R news*, 5(1), 31-35.

Obtenido de [https://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews\\_2005-1.pdf](https://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2005-1.pdf)

Cabrera, J. (2013). Lógica Clásica y lógica difusa: facetas que las caracterizan. *Estoa*, 91-101.

Cárdenas, R. (22 de Agosto de 2007). *Predicción de terremotos*. Obtenido de

[www.cienciorama.unam.mx](http://www.cienciorama.unam.mx):

[http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/96\\_cienciorama.pdf](http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/96_cienciorama.pdf)

Chandwani, V. (29 de Agosto de 2013). *Classification of Earthquakes*. Obtenido de

<https://civildigital.com/classification-earthquakes/>

Cube, M. (29 de Enero de 2020). Qué es y cuál es la diferencia entre: terremoto, sismo y temblor. Chile.

Delanoy, R. (2010). *Aspectos de Sismología Dominicana*. Santo Domingo:

Universidad Autónoma de Santo Domingo.

Diario El Comercio. (2016). *Ecuador creará un Comité de Reconstrucción de zonas afectadas por terremoto*. Obtenido de

<https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-creara-comite-reconstruccion-terremoto.html>

- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., & Dart, R. (Marzo de 2003). *Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and Its Offshore Regions*. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-289/OFR-03-289-map.pdf>
- Engdahl, E., & Villaseñor, A. (2002). Global Seismicity: 1900–1999, in International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A, Chapter 41, W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger (Editors). *Academic Press*, 665-690.
- Espíndola, V., & Pérez, X. (2018). ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y como se miden? *Revista Ciencia*, 8-15.
- Esri. (s.f). *Cómo funciona la Superposición difusa*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de ArcGIS Desktop Portal: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-overlay-works.htm>
- Estrada, L. (2012). *Apuntes de Sismología*. San Miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
- Farías, C. (05 de Diciembre de 2017). *Columna de sismología: Un avance en la alerta temprana de terremotos y tsunamis*. Obtenido de <https://www.latercera.com/noticia/columna-sismologia-einstein-los-terremotos/>
- Feizizadeh, B., Shadman, M., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 1-14.
- Flores, A. (1949). Fotografías del terremoto de 1949. *Palacio Municipal de Pelileo*. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, Pelileo.

- Flores, E. C. (2011). *Determinación de Incrementos de Probabilidad en el Tiempo (TIP) para la ocurrencia de grandes terremotos en el Perú (Aplicación del Algoritmo M8)*. Arequipa: Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional de San Agustín.
- Franco, S., Kostoglodov, V., Larson, K. M., Manea, V., & Santiago, J. (2005). Propagation of the 2001–2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico. *Earth Planets Space*, 973-985.
- Gallego Silva, M. (2003). Discourse on Earthquakes. *Revista de Ingeniería*, 71-84.
- Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1363-1367.
- Geller, R. J. (1997). Earthquake prediction: a critical review. *Gephysical Journal International*, 425-450.
- Giner, J., & Molina, S. (2001). *Sismicidad y Riesgo Sísmico en la C.A.V.* Alicante: Club Universitario.
- Glencoe Science. (2001). *Glencoe Science: Level Blue, Student Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
- Gómez Proaño, M. H. (2019). *Análisis con SIG de la ocurrencia de terremotos y tsunamis en las costas ecuatorianas de Esmeraldas y Manabí*. Quito: Tesis de Maestría, Universidad de Salzburg.
- González, Á. (2018). El catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional: Una guía para el usuario. *Resúmenes de la 3ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*, (págs. 257-260). Alicante, España.
- González, J. (2001). *Estructura anelástica de coda-Q en la Península Ibérica*. Cataluña: Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.

- Grupo de Análisis de situaciones Meteorológicas Adversas. (s.f.). *Terremotos: Características*. Recuperado el 01 de Julio de 2020, de <http://gama.am.ub.es/edrinacas/riscos/altres/terremotos/caracteristiqueste.htm>
- Guglielmi, A., & Klain, B. (02 de Septiembre de 2019). *Global Magnitude of the Earthquakes*. doi: arXiv:1909.00879
- Güney, H. (2015). Poseidon as a God of Earthquake in Roman Asia Minor. *Revue Numismatique*, 293-315.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of América*, 34, 185-188.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. New Jersey, Princeton: Princeton University Press.
- Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D., & Krishna, S. (2014). *Serie Fascículos: Sismos*. México D.F: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Hays, W. (1991). Aspectos fundamentales de la geología y la sismología para la microzonificación sísmica. *U.S Geological Survey*, 217-248.
- Herráiz, M. (1997). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros*. Lima: CISMID.
- IES la Cabrera. (2012). *Imagen digital*. Obtenido de Cuarto informatica: <http://cuartoinformatica.tecn julio.com/wp-content/uploads/2013/01/La-imagen-digital.pdf>
- Instituto Geofísico-EPN. (09 de Agosto de 2001). *Sismo de Pomasqui-10 de agosto de 1990*. Obtenido de <https://www.ige pn.edu.ec/servicios/noticias/466-sismo-de-pomasqu%C3%AD-10-de-agosto-de-1990>
- Instituto Geofísico-EPN. (17 de Abril de 2016). *Informe Sísmico Especial N. 13-2016*. Recuperado el 18 de Febrero de 2020, de Informe técnico del sismo de

Pedernales: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016>

Instituto Geofísico-EPN. (02 de Junio de 2018). *¿Sabes cuál es la diferencia entre sismo, temblor y terremoto?* Obtenido de

<https://www.facebook.com/IGEPNecuador/photos/a.686797484825801/945082752330605/?type=3&theater>

Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Teoría sobre Sismología*. Recuperado el 13 de Junio de 2020, de <http://www.ign.es/resources/docs/IGNCnig/SIS-Teoria-Sismologia.pdf>

Instituto Nacional de Prevención Sísmica. (s.f.). *Los terremotos*. Recuperado el 17 de Mayo de 2020, de [www.inpres.gob.ar](http://www.inpres.gob.ar):

<https://es.calameo.com/read/00221467850d20c54950b>

Instituto Nacional de Prevención Sísmica. (s.f.). *Historia de la Sismología*. Recuperado el 10 de Junio de 2020, de Inpres:

<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Historia%20de%20la%20Sismolog%C3%ADa.pdf>

Instituto Nacional de Prevención Sísmica. (s.f.). *Pioneros de la Sismología*.

Recuperado el 08 de Mayo de 2020, de INPRES:

<http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Pioneros%20de%20la%20sismolog%C3%ADa.pdf>

Instituto Oceanográfico-Armada del Ecuador. (12 de Septiembre de 2005). *Derrotero de la costa continental e insular del Ecuador*. Obtenido de INOCAR:

[https://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero\\_2005.pdf](https://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero_2005.pdf)

Ismail-Zdeh, A., & Kossobokov, V. (2011). Earthquake Prediction, M8 Algorithm.

*Encyclopedia of Earth Series*, 178-182.

- Jaramillo, C., Cruz, M., Padilla, O., & Toulkeridis, T. (2018). Comparative Determination of the Probability of Landslids Occurrences and Susceptibility in Central Quito, Ecuador. *IEEE*, 136-143.
- Kanamori, H. (2003). Earthquake Prediction: An overview. *International Geophysics*, 1205-1216.
- Keilis-Borok, V., & Kossobokov, V. (1986). Time of Increased Probability for the great earthquakes of the world. *Comput. Seismol.*, 48-58.
- Keilis-Borok, V., & Kossobokov, V. (1990a). Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 73-83.
- Keilis-Borok, V., & Kossobokov, V. (1990b). Times of Increased Probability of Strong Earthquake ( $M > 7.5$ ) Diagnosed by Algorithm M8 in Japan and Adjacent Territories. *Journal of Geophysical Research*, 413-422.
- Keilis-Borok, V., Shebalin, P., & Zaliapin, V. (2002). Premonitory patterns of seismicity months before a large earthquake: Five case histories in Southern California. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 16562-16567.
- Magnani, M., Blanpied, M., DeShon, H., & Hornbach, M. (2017). Discriminating between natural versus induced seismicity from long-term deformation history of intraplate faults. *Science Advances*, 1-12.
- Mogi, K. (1985). *Earthquake Prediction*. California: Academic Press.
- Mojarab, M., Memarian, H., Mehdi, Z., & Kossobokov, V. (2014). An application of earthquake prediction algorithm M8 in eastern Anatolia at the approach of the 2001 Van earthquake. *Journal of Earth Science*.
- Molina, S., Giner, J., & Jáuregui, P. (2004). El tamaño de los terremotos: Intensidad y Magnitud. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 99-107.

- Musson, R., & Cecić, I. (Junio de 2011). *Intensity and Intensity Scales*. Obtenido de [https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item\\_43219/component/file\\_916905/content](https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_43219/component/file_916905/content)
- Nagamine, K., & Sugisaki, R. (1991). Co-seismic changes of subsurface gas compositions disclosed by an improved seismo-geochemical system. *Geophysical Research Letters*, 2221-2224.
- Organización Chile Cubica. (s.f.). *Diferencia entre sismo y terremoto*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de <https://www.chilecubica.com/sismo-terremoto/diferencia-entre-sismo-y-terremoto/>
- Ouzounov, D., Pulinets, S., Hattori, K., & Taylor, P. (2018). *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. American Geophysical Union: Willey.
- Pacheco, J., & Sykes, L. (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1306-1349.
- Padilla, O. (2007). Fundamento teórico para la modelización de variables ambientales mediante operadores difusos. *Revista Geoespacial*, 3-10.
- Parra, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*. Madrid: Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Pavlis, G. L. (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. En S. Stein, & M. Wyssession, *Seismological Research Letters* (págs. 824-825).
- Pérez, R. (2005). Conceptos Fundamentales de Lógica Difusa. *Serie de presentaciones TDX*.
- Portal NTN24. (18 de Abril de 2016). *¿Cuál es la diferencia entre temblor, sismo o terremoto?* Obtenido de

<https://www.facebook.com/NTN24/photos/a.513138065364263/1215977041747025/?type=3&theater>

Preethi, G., & Santhi, B. (2011). Study on techniques of Earthquake Prediction.

*International Journal of Computer Applications*, 55-58.

Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería*

*Sísmica*, 1-26.

Quizhpe, C. (07 de Junio de 2016). *Vulnerabilidad y reconstrucción: el caso del Terremoto de Ecuador (Abril 2016)*. Obtenido de

<https://elordenurbano.com/vulnerabilidad-y-reconstruccion-el-caso-del-terremoto-del-16-de-abril-de-2016-en-ecuador/>

Ramírez, N. (19 de Mayo de 2012). *La historia del único terremoto que la ciencia ha podido predecir*. Obtenido de Diario Emol-Chile:

<https://www.emol.com/noticias/nacional/2012/05/17/540993/la-vez-en-que-los-cientificos-lograron-predecir-un-terremoto.html>

Reasenberg, P. (1985). Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research*, 5479-5495.

Red Cubana de Ciencia. (2013). *Los Terremotos*. Obtenido de

[http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2013\\_ElSalvador\\_terremotos.pdf](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2013_ElSalvador_terremotos.pdf)

Red sísmica de Puerto Rico. (s.f.). *Predicción de terremotos*. Recuperado el 12 de Julio de 2020, de Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez:

<http://redsismica.uprm.edu/Spanish/educacion/terremotos/prediccion.php>

Reid, H. F. (1911). *The elastic-rebound theory of earthquakes*. California: Universidad de California. Bull. Dept. Geol.

Reid, H. F. (1914). The Lisbon earthquake of November 1, 1755. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53-80.

- Reid, H. F., & Taber, S. (1919). *The Porto Rico Earthquake of 1918 with descriptions of earlier earthquakes: Report of the Earthquake Investigation Commission*. US Government Printing Office.
- Riggio, A., & Santulin, M. (2015). Earthquake forecasting: A review of radon as seismic precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 95-114.
- Rikitake, T. (1975). Earthquake precursors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1133-1162.
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Quito: Nacional.
- Rothé, J. (1969). *The seismicity of the Earth, 1953-1965*. París: UNESCO.
- Ruiz, M. (1990). *Sismo de Pomasqui-10 de Agosto de 1990*. Obtenido de <https://www.igeptn.edu.ec/servicios/noticias/content/49-historico?start=400>
- Salcedo, D., Padilla, O., Morales, B., & Toulkeridis, T. (2018). Landslide susceptibility mapping using fuzzy logic and multi-criteria evaluation techniques in the city of Quito, Ecuador. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1-33.
- Scholz, C. (2019). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Londres: Cambridge University Press.
- Scholz, C., Sykes, L., & Aggarwal, Y. (1973). Earthquake Prediction: A Physical Basis. *Science*, 803-810.
- Scordilis, E. (2005). Globally valid relations converting Ms, mb and Mjma to Mw. *Nato Advanced Research Workshop on "Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries"*, (págs. 158-161). Borovetz.
- Secretaría de Finanzas Públicas, Estado de Hidalgo. (08 de Septiembre de 2017).  
¿Cuál es la diferencia? Etimológicamente, sismo y terremoto significan lo mismo:

*temblor*. Obtenido de

<https://twitter.com/JessieBla/status/906282478612217858/photo/1>

Segovia, M. (14 de Mayo de 2009). *Informe sísmico para el Ecuador-año 2008*.

Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/inf-sism/sismicos-anuales/226--45/file>

Segovia, M. (Diciembre de 2019). *Informe sísmico para el año 2019*. Obtenido de

Instituto Geofísico (IG-EPN): <https://www.igepn.edu.ec/informes->

[sismicos/sismicos-anuales/23713-informe-sismico-para-el-ecuador-ano-2019/file](https://www.igepn.edu.ec/informes-sismicos/sismicos-anuales/23713-informe-sismico-para-el-ecuador-ano-2019/file)

Servicio Geológico Mexicano. (02 de Octubre de 2017). *Sismos: Causas,*

*características e impactos*. Obtenido de

<https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e->

[impactos?idiom=es](https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e-impactos?idiom=es)

Servicio Sismológico Nacional. (s.f.). *Magnitud de un Sismo*. Recuperado el 29 de

Junio de 2020, de Instituto de Geofísica, México:

<http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>

Srdanovic, V., Aristizabal, H., Fulla, M., & Florez, C. (2012). Ondas sísmicas y

sensores inalámbricos: herramientas potenciales para la prospección de

subsuelos a baja profundidad. *Revista Cintex*, 80-95.

Stepp, J. (1972). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget

Sound Area and its effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. En S.

T. Hardling, *Contributions to Seismic zoning, U.S. National Oceanic*

*and Atmospheric Administration Technical Report ERL 267-ESL 30*. Washington

D.C.

Suzuki, K. (1996). Namazu-e Shinsai to Nihon bunka (Namazu-e: Earthquakes and

Japanese Culture). *Asian Folklore Studies*, 355-357.

Sykes, L., Shaw, B., & Scholz, C. (1999). Rethinking Earthquake Prediction. *Pure and*

*applied Geophysics*, 207-232.

- Taipe, L. (2013). *Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el período 2000-2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos*. Quito: Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional.
- Tapia-Hernández, E., Reddy, E., & Oros, L. (2017). Retos e incertidumbres en la predicción y prevención del riesgo sísmico. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 66-87.
- Tapia-Hernández, E. (2013). Observaciones sobre la predicción de sismos: una visión actual. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 255-269.
- Tavera, H., Agüero, C., Fernández, E., & Rodríguez, S. (2001). *Catálogo sísmico del Perú 1471-1982*. Obtenido de Instituto Geofísico del Perú: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/789>
- Tele13. (04 de Noviembre de 2019). *¿Cuál es la diferencia entre temblor, sismo y terremoto?* Obtenido de Tele13 Noticias: <https://www.t13.cl/noticia/mundo/cuales-diferencia-temblor-sismo-y-terremoto-04-11-2019>
- Todo Noticias. (20 de Septiembre de 2017). *Cuál es la diferencia entre sismo, temblor y terremoto*. Obtenido de [https://tn.com.ar/internacional/cual-es-la-diferencia-entre-sismo-temblor-y-terremoto\\_821811](https://tn.com.ar/internacional/cual-es-la-diferencia-entre-sismo-temblor-y-terremoto_821811)
- Toulkeridis, T., Chunga, K., Rentería, W., Rodríguez, F., Mato, F., Nikolau, S., & Vera-Grunauer, X. (2017). The 7.8 Mw earthquake and Tsunami of 16th April 2016 in Ecuador: Seismic Evaluation, Geological Field Survey and Economic Implications. *Science of tsunami hazards*, 197-242.
- Toulkeridis, T., Mato, F., Toulkeridis-Estrella, K., Salinas, J., Tapia, S., & Fuertes, W. (2018). Real-time radioactive precursor of the April 16, 2016 Mw 7.8 Earthquake and Tsunami in Ecuador. *Science of tsunami hazards*, 207-219.

- Toulkeridis, T., Porras, L., Tierra, A., Toulkeridis-Estrella, K., Cisneros, D., Luna, M., & Salazar, R. (2019). Two independent real-time precursors of the 7.8 Mw earthquake in Ecuador based on radiative and geodetic processes-Powerful tools for an early warning system. *Journal of Geodynamics*, 12-22.
- Troya, A., & Troya, R. (1999). El terremoto de Ibarra de 1868. *El pintor de los Andes Ecuatorianos*. Ediciones Banco Central, Quito.
- Universidad de la Coruña. (s.f.). *¿Qué es un terremoto?* Recuperado el 24 de Mayo de 2020, de [https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/QUE\\_ES.htm](https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/QUE_ES.htm)
- Universidad de Mendoza. (2002). *Sismología*. Obtenido de Facultad de Arquitectura y Urbanismo: <http://www.um.edu.ar/um/fau/estructura5.old/SISMOLOGIA.htm>
- Universidad Nacional de Costa Rica. (s.f.). *Hipocentro y Epicentro*. Recuperado el 26 de Mayo de 2020, de Sismología: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/faqs/sismologia/hipocentro-y-epicentro>
- USGS. (s.f.). *Can you predict earthquakes?* Recuperado el 18 de Junio de 2020, de [https://www.usgs.gov/faqs/can-you-predict-earthquakes?qt-news\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/can-you-predict-earthquakes?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products)
- USGS. (s.f.). *The Science of Earthquakes*. Recuperado el 16 de Junio de 2020, de [https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/science-earthquakes?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/science-earthquakes?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Utsu, T. (2002). *Relationships between magnitude scales, en International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part A.* (W. Lee, H. Kanamori, P. Jennings, & C. Kisslinger, Edits.) USA: Elsevier Science.
- Uyeda, S., Nagao, T., & Kamogawa, M. (2011). Earthquake Precursors and Prediction. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 168-178.

- Vera, B. (2003). *Evaluación de errores de datos sismológicos y sus efectos sobre los parámetros y modelos derivados de éstos para una región determinada cubierta por la red del Observatorio Sismológico del SurOccidente - OSSO*. Santiago de Cali: Tesis para obtención de Ingeniería. Universidad del Valle.
- von Humboldt, A. (1835). *Travels and Researches of Alexander von Humboldt: Being a Condensed Narrative of His Journeys in Equinoctial Regions of America and In Asiatic Russia: together with Analysis of his more important Investigations*. (J. & Harper, Ed.)
- Wang, K., Chen, Q.-F., Sun, S., & Wang, A. (2006). Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 757-795.
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382. Obtenido de <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Wolfgang, K. (2010). *The Mathematics of GIS*. Vienna: University of Vienna.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 338-353.
- Zafrir, R., Padilla, O., Cruz, M., Toulkeridis, T., Rodriguez, F., Mato, F., & Morales, B. (2018). Numerical Probability Modeling of Past, Present and Future Landslide Occurrences in Northern Quito, Ecuador. *IEEE*, 117-125.

**Anexos**