



**EL INSTITUTO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS DE  
DESASTRES DEL ESTADO DE CHIAPAS A TRAVÉS DE LA  
ESCUELA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CAMPUS CHIAPAS**



**Modelo de evaluación multicriterio GIS para el  
trabajo de gabinete de selección de sitios de  
redes sísmicas.  
Caso de estudio Chiapas, México.**

# **TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Maestro en Gestión de Riesgos y Protección Civil**

**PRESENTA:**

**Antonio Noe Pérez Aguilar.**

**DIRECTOR:**

**M. en. I. Arturo Montalvo García**

Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, 29 de mayo de 2019.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	II
ÍNDICE DE TABLAS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
RESUMEN.....	VII
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Historia del arte de la sismología instrumental en Chiapas .....	12
2.1.1. Redes Sismológicas del Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sismológico de Chiapas (CMVS) .....	12
2.1.2. Red de monitoreo sísmico Volcán Chichón .....	13
2.1.3. Red de monitoreo sísmico Volcán Tacaná .....	14
2.1.4. Red de monitoreo sísmico de Banda Ancha.....	16
2.2. Procesamiento para la selección de sitios de interés para estaciones sísmicas.....	12
2.3. Estudios de gabinete .....	17
2.2.1. Regiones geográficas de interés .....	18
2.2.2. Condiciones sismo-geológicas .....	19
2.2.3. Condiciones topográficas .....	19
2.2.4. Accesibilidad .....	20
2.2.5. Ruido sísmico regional .....	21
2.2.6. Telemetría y potencia de transmisión .....	22
2.2.7. Uso de la tierra, propiedad y uso futuro.....	23
2.2.8. Condiciones climáticas.....	23
2.2.9. Energía .....	24
2.2.10. Seguridad .....	24
2.2.11. Geología del sitio .....	25
2.2.12. Otros.....	26
3. METODOLOGÍA.....	27

3.1.	Enfoque epistémico de la investigación .....	27
3.2.	Tipo de investigación .....	27
3.3.	Alcance de la investigación .....	27
3.4.	Diseño de la investigación .....	28
3.5.	Tipo de variables a utilizar .....	29
3.6.	Instrumento metodológico .....	29
3.6.1.	Primera fase: recopilación de información base .....	32
3.6.2.	Segunda fase: técnicas de evaluación multicriterio .....	35
4.	CASO DE ESTUDIO CHIAPAS, MÉXICO .....	37
4.1.	Motivación .....	37
4.2.	Aplicación de la metodología, modelo de evaluación multicriterio .....	38
4.2.1.	Recopilación de información base .....	38
4.2.2.	Técnicas de evaluación multicriterio .....	39
5.	RESULTADOS Y TRABAJOS FUTUROS .....	46
5.1.	Resultados y discusión .....	46
5.2.	Trabajos futuros .....	49
6.	BIBLIOGRAFIA .....	51
7.	APENDICE .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I – Valores típicos (promedio y aproximados) de las constantes de elasticidad, densidad, relación de Poisson y velocidades de ondas sísmicas para algunos materiales seleccionados (adaptado de Bormann, P., et al., in Bormann, P., Ed. 2009). .....	26
Tabla II – Información recopilada para el presente trabajo de gabinete. ....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Técnicas de evaluación multicriterio. (a) Compilación de información y definición de variables, (b) estudios previos, definición de parámetros y construcción del modelo. ....	9
Figura 1.2. Aspectos generales del sismo de 7 de septiembre de 2017 (fotos cedidas por la Secretaria de protección Civil, Chiapas, 2017). ....	10
Figura 2.1. Estación Sísmica Viejo Volcán a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp, c) Digitalizador y d) Antena de Telemetría (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018) .....	13
Figura 2.2. Estación sísmica Francisco León a) Caseta sísmica, b) sensor sísmico De Banda Ancha Guralp y c) Digitalizador (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018). ....	14
Figura 2.3. Caseta Estación Sísmica Nicapa (IIGRCC, 2018). ....	14
Figura 2.4. Estación Sísmica Chiquihuites a) Caseta sísmica, b) Sensor ESísmico De Banda Ancha Guralp y c) antena de telemetría Digital (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018). ....	15
Figura 2.5. Estación Sísmica La Patria a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018). ....	15
Figura 2.6. Estación Sísmica Pavencul a) Caseta sísmica y b) Telemetría Digital (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018). ....	16
Figura 2.7. Estaciones Sísmicas de Banda Ancha en el estado de Chiapas (Adaptado de SSN, 2018). ....	16
Figura 2.8. (a) Mapa de fallas geológicas de Eslovenia, (b) mapa de sismicidad y (c) área de estudio con información de isolíneas con	

energía liberada durante un periodo de tiempo (en J/km <sup>2</sup> ) (TRNKOCKY, A., et al., in Bormann, P., Ed. 2009). .....	18
Figura 2.9. Subdivisión del área de estudio en tres grados de calidad de roca, los puntos marcan los sitios de interés (TRNKOCKY, A., et al., 2012).....	19
Figura 2.10. Ejemplo de acceso fácil a una estación remota vía caminos rurales, estación de Monte Oscuro, Azores, Portugal (foto cedida por Montalvo, A. 2018). .....	21
Figura 2.11. Ejemplo de mapa de climatología, lluvia acumulada promedio anual en México ( <a href="https://smn.conagua.gob.mx">https://smn.conagua.gob.mx</a> , 2019). .....	23
Figura 2.12. Aspectos generales de un abrigo sísmico. (a) Estación sísmica con bloques de cemento, (b) pormenor de una puerta metálica con cerradura de seguridad y (c) cercado exterior (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018). .....	25
Figura 3.1. Diagrama de diseño multicriterio Espacial (adaptado de Malczewski J., 1999).....	31
Figura 3.2. Capas de información geográfica obtenidas de instituciones oficiales.....	32
Figura 3.3. Modelo multicriterio para la selección de sitios de interés para nuevas estaciones sísmicas, trabajo de gabinete. ....	36
Figura 4.1. Ambiente geotectónico mexicano, modificado de Atlas nacional de Riesgos ( <a href="http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx">www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx</a> , 2017).....	37
Figura 4.2. (a) Sismicidad en México, 2018 ( <a href="http://www.ssn.unam.mx">www.ssn.unam.mx</a> , 2019) y (b) Mapa de zonificación sísmica, estado de Chiapas, modificado ( <a href="http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx">www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx</a> , 2017) .....	38

Figura 4.3. Capas de información geográfica recopiladas de instituciones oficiales. ....	40
Figura 4.4. Mapa de litología y restricciones de cuerpos de agua de Chiapas. Tres categorías: blanco exclusión, verde apto, amarillo poco apto y rojo no apto. ....	41
Figura 4.5. Ejemplo de mapas temáticos con variables matriciales para la operación matemática del modelo. (a) Mapa de clases de distancias a fallas y fracturas, (b) mapa de carreteras y caminos de Chiapas; y (c) mapa de densidad de sismos 1900-2017.....	42
Figura 4.6. Primeras ejecuciones del modelo, resultado 599 puntos de interés.....	43
Figura 4.7 Sitios que cumplen con el criterio de radio de 15 Km al repetidor más próximo. ....	43
Figura 4.8 Perfiles de línea de vista aplicado a sitios de interés.....	44
Figura 4.9. Mapa resultante de la ejecución del modelo GIS de evaluación multicriterio y filtros de telemetría; 42 sitios de interés para la instalación de estaciones sísmicas. ....	45
Figura 5.1. Mapa de polígonos o puntos de interés para la instalación de una red sísmica, primeras pruebas del modelo .....	46
Figura 5.2. Sitios que cumplen con el criterio proximidad a repetidor.....	47
Figura 5.3. Mapa final, 42 sitios de interés para instalación de estaciones sísmicas, estudio de gabinete. ....	48

## RESUMEN

México es un país con elevada actividad sísmica y volcánica debido a su particular encuadramiento geotectónico dominado por la conjunción de cinco placas tectónicas, las cuales son Placa de Cocos, Placa del Pacífico, Placa Rivera, Placa Norteamericana y Placa del Caribe, la mayor parte del territorio nacional asienta en la placa Norteamericana e interactúa con las placas de Cocos y Rivera dando origen a una gran zona de subducción que es responsable por generar sismos de magnitud elevada (SSN, 2017).

Durante el año de 2017 el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2018), en su catálogo de sismos fuertes, registró un total de 26,413 sismos. Siendo la zona de subducción formada por la interacción de las placas Cocos, Rivera y Norteamericana responsable por la mayoría de los mismos.

Con una superficie que representa el 3.7% del total nacional (72,527 km<sup>2</sup>), Chiapas se encuentra posicionado en séptimo lugar en densidad poblacional (5'217,908 habitantes) (INEGI, 2017). La mayor parte de su superficie se encuentra en la placa Norteamericana en contacto con la placa del Caribe a lo largo de la falla Polochic-Motagua; esta interacción resulta en un elevado riesgo sísmico para el estado de Chiapas.

Chiapas por su localización geográfica, al sureste de la Ciudad de México, se ve severamente afecto por esta actividad sísmica, como ejemplo, el pasado Septiembre 7 de 2017 ocurrió un sismo destructivo de magnitud 8.2 con localización epicentral a 140 km al suroeste de la ciudad de Pijijiapan; causando la muerte a 16 personas, afectando 97 municipios (de 122) y 58,365 viviendas tan solo en el estado de Chiapas (SEPC, 2017). A pesar de su elevado nivel de riesgo sísmico poca instrumentación ha sido desplegada, derivando en una falta de información para la toma de decisiones en materia de Protección Civil.

Así siendo, impera la necesidad del diseño, la implementación y la operación de una red de vigilancia y monitoreo sísmico y volcánico con capacidades de alertamiento (EEWS) en el estado. Con el objetivo principal de solventar esta

necesidad estatal, se propone, como trabajo de tesis, un estudio de gabinete para determinar sitios potencialmente adecuados para la instalación de instrumentos sísmicos.

Para tal efecto se procedió con el análisis geoespacial del territorio estatal, sus ambientes tectónicos, geología, comunicaciones terrestres y otros parámetros asociados. Como resultado, se obtuvieron un total de 42 sitios de elevado interés que cumplen los criterios antes mencionados.

En fases posteriores (trabajo de campo e implementación) se pretende la evaluación *in situ* de cada punto para su validación, efectuando, para tal, visitas de campo y ensayos de ruido sísmico e de radio telemetría. Una vez completados estos ensayos, se procederá al subimiento de un proyecto de investigación que permita la adquisición, instalación y mantenimiento de una red sísmica estatal de por lo menos 10 estaciones; así como también, la construcción de un edificio para albergar el Centro de Adquisición de Datos y equipas técnicas y científicas.

## ABSTRACT

Mexico is a country with greater seismic and volcanic activity due to its particular geotectonic framework dominated by the conjunction of five tectonic plates, the coconut plate, the Pacific plate, the Rivera Square, the North American Plate and the Caribbean Plate, the largest part of the national territory in the North American plate and interaction with the plates of Cocos and Rivera in a large subduction zone that is responsible for generating earthquakes of high magnitude (SSN, 2017).

During the year of 2017, the National Seismological Service (SSN, 2018), in its catalog of strong earthquakes, reported a total of 26,413 earthquakes. Being the subduction zone formed by the interaction of the Cocos, Rivera and North American plates responsible for most of them.

With an area that represents 3.7% of the national total (72,527 km<sup>2</sup>), Chiapas is ranked seventh in population density (5'217,908 inhabitants) (INEGI, 2017). Most of its surface is found in the North American plate in contact with the Caribbean plate along the Polochic-Motagua fault; This is a seismic risk for the state of Chiapas.

Chiapas for its geographic location, southeast of Mexico City, has been severely affected by seismic activity, as an example, on September 7, 2017 a destructive of magnitude 8.2 with epicentral location at 140 km southwest of the city of pijjiapan; Causing death to 16 people, affecting 97 municipalities (out of 122) and 58, 365 homes in the state of Chiapas alone (SEPC, 2017). Despite its level of seismic risk, little instrumentation has been deployed, resulting in a lack of information for making decisions on Civil Protection.

That's right, as a consequence of the need for the design, implementation and operation of a seismic and volcanic monitoring and monitoring network with alert capabilities (EEWS) in the state. With the main objective of solving this state need, it is proposed, as a thesis work, a cabinet study to determine the results of the installation of seismic instruments.

For this purpose, we proceeded with the spatial analysis of the state territory, its tectonic environments, geology, terrestrial communications and other associated parameters. As a result, a total of 42 high interest sites were obtained that meet the aforementioned criteria.

In subsequent phases (fieldwork and implementation) the in situ evaluation of each point is intended for validation, making, for such, field visits and seismic noise and radio telemetry tests. Once these tests have been completed, a research project will be carried out to allow the acquisition, installation and maintenance of a state seismic network of at least 10 stations; as well as, the construction of a building to house the Data Acquisition Center and technical and scientific equipment.

# 1. INTRODUCCIÓN

La implementación de una nueva red de estaciones sísmicas requiere importantes consideraciones como los estudios de gabinete (*off-site studies*) y de campo, la obtención de financiamiento para la adquisición de equipamiento y construcción de infraestructuras; y, claro, el proceso de instalación y construcción.

Los estudios de gabinete son relativamente poco costosos y deben ser realizados primeramente para minimizar el trabajo de campo futuro y los costos asociados a los mismos (Trnkoczy, A., *et al.*, in Bormann, P., ed., 2002). Este estudio incluye la región geográfica de interés, las condiciones sismo-geológicas de dicha área, fuentes de ruido sísmico, transmisión de datos y regulaciones de potencia, topografía, accesibilidad, uso de suelo, propiedad del suelo, clima, entre otras (Havskov, J., Alguacil, G., 2001).

Con el intuito de simplificar el proceso de selección de sitios de interés para la instalación de estaciones de una nueva red sísmica, se puede utilizar técnicas geoespaciales y matemáticas de los programas de GIS; generar un modelo de características universales que pueda ser implementado en cualquier área sismo-genética del planeta.

Una gran motivación para el desarrollo de este tipo de estudio/modelo es la disponibilidad de información cartográfica en formato de información geográfica (GIS), la cual puede ser consultada u obtenida en las Oficinas de Agencias Estatales, Universidades y Centros de Investigación.

Utilizando programas GIS quiera comerciales quiera de licencia libre como herramienta de captura, construcción y gestión para el área geográfica de estudio, e implementando técnicas de evaluación multicriterio (MCDM) es posible crear un modelo capaz de procesar información de capas y metadatos GIS para determinar sitios de interés en categorías relevantes para el utilizador.

La construcción del modelo se divide en tres fases principales, la compilación de datos/información (figura 1.1.a), los estudios previos y la construcción del soporte digital que incluye todas las transformaciones necesarias y el modelo propiamente dicho (figura 1.1.b); y finalmente la validación de la información *in situ*.

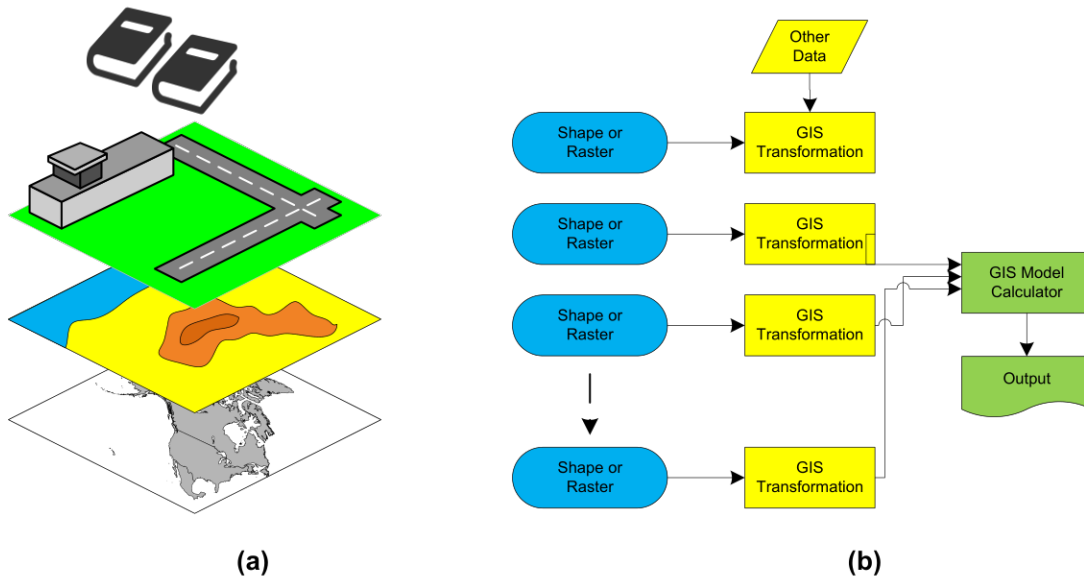


Figura 1.1 Técnicas de evaluación multicriterio. (a) Compilación de información y definición de variables, (b) estudios previos, definición de parámetros y construcción del modelo.

El modelo resultante será una más valía como herramienta para los estudios de gabinete previos en áreas de interés para la vigilancia sísmica tal como áreas tectónicas y volcánicas a nivel global.

Como caso de estudio, para la evaluación experimental del modelo, se propone el estado mexicano de Chiapas. Este estado presenta una actividad sísmica elevada y consecuentemente un riesgo sísmico de elevado, como quedó demostrado por el sismo de 7 de septiembre de 2017 (figura 1.2), con un saldo oficial de 16 víctimas mortales, 349,080 viviendas de diferente construcción, 2,000 escuelas, entre otros (informe EDAN, 2017).

El estado de Chiapas cuenta con una red de monitoreo de sismos fuertes de cuatro estaciones, operada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), suficiente para la vigilancia y cuantificación de eventos sísmicos fuertes mas no para el

estudio del ambiente geotectónico o la implementación de sistemas de alertamiento temprano del mismo.





Figura 1.2. Aspectos generales del sismo de 7 de septiembre de 2017 (fotos cedidas por la Secretaria de protección Civil, Chiapas, 2017).

En el presente trabajo de tesis y caso de estudio, se procedió al análisis geoespacial del territorio estatal de Chiapas, sus ambientes tectónicos, geología, recursos actuales de telecomunicaciones e infraestructuras disponibles; y otros, utilizando el método análisis por evaluación multicriterio (MCDM) y la construcción de un modelo en GIS para su implementación.

Se estudiaron los diversos parámetros instrumentales y de sitio citados en la bibliografía para atribuir las ponderaciones a las diversas capas de información geográfica con el intuito de poder ser evaluadas por el modelo propuesto; esperando como resultado un mapa con sitios de interés necesarios para la implantación de una nueva red sísmica para Chiapas.

## **2. REFERENTES TEÓRICOS CONCEPTUALES**

La capacidad de cualquier red sísmica en detectar terremotos y registrar formas de onda representativa, son gobernadas por la señal y las características de ruido de los sitios, independientemente de cuanto el instrumento utilizado sea tecnológicamente avanzado o caro.

Si el ruido sísmico en los sitios es elevado, muchos de los beneficios de los modernos equipamientos se perderán; tal como el rango dinámico. Por otro lado, si el ruido presente contiene excesivos picos o transitorios, o si el ruido generado por actividades humanas está presente, implica la utilización de parámetros de disparo automático más elevados y por ende poca sensibilidad de la red.

Si la estación es instalada en suelo poco consolidado, los instrumentos de banda larga son inútiles y los instrumentos de periodo corto presentar señales no representativas debido a los efectos del sitio. Por tanto, un procedimiento de localización de sitios profesional es esencial para el suceso de una red sísmica nueva (Trnkoczy, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

### **2.1. Historia del arte sismológica instrumental en Chiapas**

#### **2.1.1. Redes Sismológicas del Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sismológico de Chiapas (CMVS).**

El Centro de Monitoreo Volcánico y Sísmico, forma parte de Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, Perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas; creado en el año 2009. Cuenta con dos redes de monitoreo sísmico Volcánico que son la red sísmica del Volcán Chichón; que al principio inicio con estaciones de periodo Corto, siendo hasta el de marzo de 2012, cuando mudo a estaciones digitales de Banda Ancha y manteniendo una estación de Periodo Corto, cuenta con tres estaciones sísmicas, con ubicación en Viejo Volcán (VVCH), Francisco León (FLCH) y Nicapa (NCCH) y Red sísmica Volcán Tacaná cuenta con una estación central en

la ciudad de Tapachula, que es donde se recopila la información y se envía vía satélite al SSN, cuenta con una red de telemetría de Banda Ancha, cuenta con tres estaciones sísmicas, con ubicación en Chiquihuites (CHCH), La patria (CHLP) y Pavencul (CHPA) mismas que son operadas por el Servicio Sismológico Nacional; y finalmente se cuenta con 4 estaciones de Banda Ancha en Tuxtla Gutiérrez (TGIG), Comitán de Domínguez (CCIG), Pijijiapan (PGIG) y Tapachula de Córdoba y Ordoñez (THIG) (IIGRCC, consultado 2018).

### 2.1.2. Red de monitoreo Sísmico Volcán Chichón

La estación sísmica Viejo Volcán (VVCH) cuenta con un sensor sísmico de Banda Ancha Marca Guralp, serie T4R19, modelo CM640T y con un digitalizador A1845, con fecha de instalación Marzo 2013, siendo alimentados por paneles solares y enviando la señal por Radios Digitales en un canal de Frecuencia 184/5920 MHZ Figura 3.17 a) Caseta Sísmica b) Sensor sísmico, c) Digitalizador y d) Telemetría (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.1. Estación Sísmica Viejo Volcán a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp, c) Digitalizador y d) Antena de Telemetría (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018)

La estación sísmica Francisco León (FLCH) cuenta con un sensor sísmico de Banda Ancha Marca Guralp, serie T4R19, modelo CM640T y con un digitalizador A1845, con fecha de instalación Marzo 2013, siendo alimentados por paneles solares y enviando la señal por Radios Digitales en un canal de Frecuencia 184/5920 MHZ Figura 3.18 a) Caseta Sísmica b) Sensor sísmico y c) Digitalizador (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.2. Estación Sísmica Francisco León a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp y c) Digitalizador (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

La estación sísmica Nicapa (NCCH) cuenta con un sensor sísmico de Periodo Corto, con fecha de instalación Marzo 2013, siendo alimentados por paneles solares y actualmente no se tiene comunicación Figura 2.3 a) Caseta Sísmica (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.3. Caseta Estación Sísmica Nicapa (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

### 2.1.3. Red de monitoreo Sísmico Volcán Tacaná

La estación sísmica Chiquihuites (CHCH) cuenta con un sensor sísmico de Banda Ancha Marca Guralp, serie 40TD, con fecha de instalación Marzo 2012, siendo alimentados por paneles solares y enviando la señal por Radios Digitales Figura 2.4 a) Caseta Sísmica b) Sensor sísmico y c) Telemetría (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.4. Estación Sísmica Chiquihuites a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp y c) antena de telemetría Digital (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

La estación sísmica La Patria (CHLP) cuenta con un sensor sísmico de Banda Ancha Marca Guralp, serie 40TD, con fecha de instalación Marzo 2012, siendo alimentados por paneles solares y enviando la señal por Radios Digitales Figura 2.5 a) Caseta Sísmica b) Sensor sísmico (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.5. Estación Sísmica La Patria a) Caseta sísmica, b) Sensor Sísmico De Banda Ancha Guralp (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

La estación sísmica Pavencul (CHPA) cuenta con un sensor sísmico de Banda Ancha Marca Guralp, serie 40TD, con fecha de instalación Marzo 2012, siendo alimentados por paneles solares y enviando la señal por Radios Digitales Figura 2.6 a) Caseta Sísmica b) Telemetría, así mismo cuenta con una estación meteorológica instalada por la UNICACH, que consta de un Pluviómetro, Temperatura, Presión atmosférica y Humedad (IIGRCC, consultado 2018).



Figura 2.6 Estación Sísmica Pavencul a) Caseta sísmica y b) Telemetría Digital (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

#### 2.1.4. Red de monitoreo Sísmico de Banda Ancha.

Se cuentan con cuatro estaciones de Banda Ancha dispersas en el estado de Chiapas, las cuales perteneces a la red de 61 estaciones sísmicas instaladas por el Servicio Sismológico Nacional, dichas estaciones son Tuxtla Gutiérrez (TGIG), Comitán de Domínguez (CCIG), Pijijiapan (PGIG) y Tapachula de Córdoba y Ordoñez (THIG) Figura 2.7, consta de un sismómetro STS, triaxial y un acelerómetro FBA-23, con un registrador Quanterra con digitalizador de 24 bits (SSN, 2018)

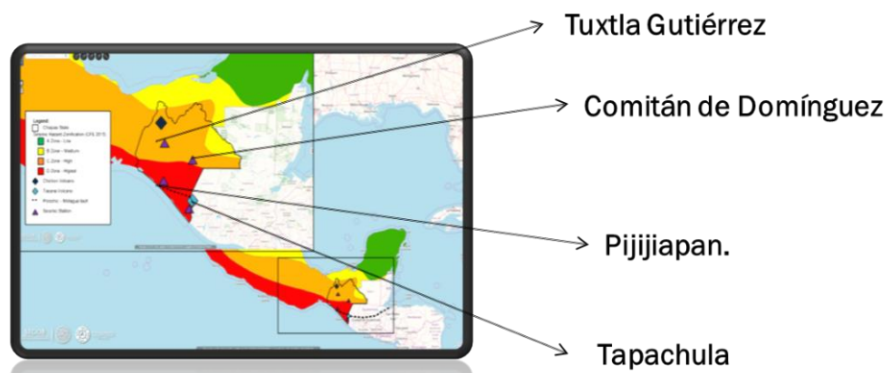


Figura 2.7 Estaciones Sísmicas de Banda Ancha en el estado de Chiapas (Adaptado de SSN, 2019).

## **2.2. Estudios de Gabinete**

Según Trnkoczy, A., *et al.* In Bormann, P., Ed. 2009, el procedimiento para la selección de sitios de interés para estaciones sísmicas, incluye dos trabajos principales: el estudio de gabinete (*off-site*) y el trabajo de campo. Siendo el trabajo de gabinete el primero a ser realizado y sin costos elevados asociados.

En este estudio pueden ser reunidos informaciones y mapas necesarios de fuentes oficiales sobre el área de interés; y en ellos elegir potenciales áreas o sitios de acuerdo a condicionantes determinadas. Esto disminuye el trabajo de campo a ser efectuado, optimizando los recursos disponibles para tal efecto.

Una lista de parámetros utilizados en el estudio de gabinete es:

- Región geográfica de interés;
- Condiciones sismo-geológicas;
- Condiciones topográficas;
- Accesibilidad;
- Ruido sísmico regional;
- Telemetría y potencia de transmisión;
- Uso de tierra, propiedad y uso futuro;
- Condiciones climáticas;
- Energía;
- Seguridad;
- Otros.

Los parámetros mencionados son descritos por Trnkoczy, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009, Havskov, J., Alguacil, G., 2002 y Ortiz, R., Montalvo, A., comunicación personal, 2018.

### **2.2.1. Región Geográfica de Interés**

El primer objetivo es definir el objetivo y la región geográfica de interés para nuestra red sísmica. Si el objetivo de la red es el monitoreo de un país, esta fase

es mayormente simplificada. Para otros proyectos, se debe examinar todo el conocimiento de fallas geológicas con el objetivo de evaluar su actividad y potencial neo-tectónico; identificar características sismo-tectónicas de mapas de sismo-tectónicos; y si está disponible, toda la información relacionada con la sismicidad en el área ya sea histórica o instrumental (figura 2.8) (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

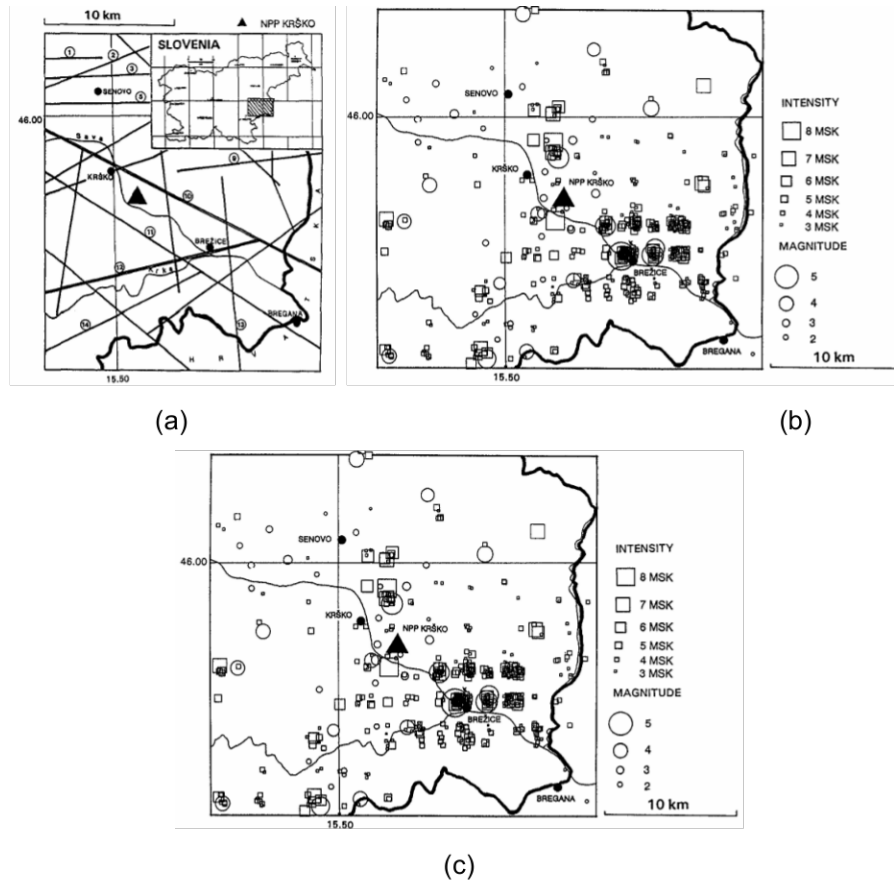


Figura 2.8. (a) Mapa de fallas geológicas de Eslovenia, (b) mapa de sismicidad y (c) área de estudio con información de isolíneas con energía liberada durante un periodo de tiempo (en  $J/km^2$ ) (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

Según Ramón Ortiz (comunicación personal, octubre 2018), una información que también sustenta la localización geográfica de las redes sísmicas son los mapas y estudios de zonas sismo-génicas.

## 2.2.2. Condiciones sismo-geológicas

Las condiciones del subsuelo en una estación sísmica influyen la señal sísmica y las condiciones de ruido que, por su vez, tienen gran influencia en la sensibilidad de la misma. Usualmente, a mayor impedancia acústica del lecho de roca, menor es el ruido sísmico. Por tanto, para una nueva red sísmica se debe preparar un mapa que muestre de manera simplificada las condiciones sismo-geológicas. Una manera de inferir este mapa es en términos de grados de impedancia acústica o calidad de lecho de roca en relación a su idoneidad para instalar las estaciones (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009). La figura 2.9 muestra un ejemplo para la región de estudio de Eslovenia, en la que se determinan tres categorías de calidad de roca.

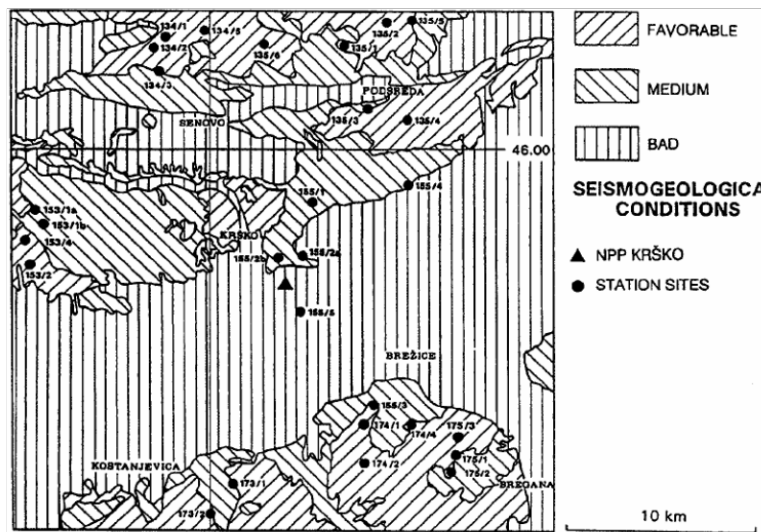


Figura 2.9. Subdivisión del área de estudio en tres grados de calidad de roca, los puntos marcan los sitios de interés (TRNKOCKY, A., *et al.*, 2012).

### 2.2.3. Condiciones topográficas

La topografía en la vecindad de una potencial estación debe ser considerada. Laderas empinadas y valles profundos pueden influenciar de forma imprevisible y desfavorable las formas de onda y amplitudes de las señales sísmicas (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed., 2002).

Aunado a esto, picos de montañas son mucho más susceptibles a ruido generado por el viento, descargas eléctricas y con alguna frecuencia hielo en las antenas de comunicaciones o GPS. Por tanto, de ser posible se deben evitar estos locales, a no ser que se trate de una necesidad como el control sísmico de presas o el monitoreo de volcanes.

La topografía tiene también una considerable influencia para las redes de radiotelemetría (RF). Las redes de telecomunicaciones benefician de cotas elevadas para transmitir grandes distancias, más debe siempre considerarse las características de la red sísmica.

#### **2.2.4. Accesibilidad**

Las estaciones sísmicas están generalmente en áreas remotas y alejadas de cualquier tipo de actividad humana, resultando en un acceso difícil quiera para su implementación quiera para mantenimiento preventivo y correctivo. Carreteras o caminos públicos no deben permitir alcanzar las mejores estaciones y caminar considerables distancias o usar vehículos de todo terreno es más o menos inevitable. Debe encontrarse un punto intermedio entre remoto y fácil acceso. Estaciones con dificultad de acceso son caras de establecer y mantener, pues en consecuencia sufren de un mantenimiento inadecuado y tiempos de reparación elevados (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed., 2002).

Debe por tanto ser utilizados mapas de carreteras y caminos con escalas adecuadas que permitan estimar las dificultades y tiempos necesarios para acceder a los potenciales sitios. En sitios montañosos la proximidad de camino y la elevación del terreno son muy importantes y requieren especial atención.

Havskov, J., Alguacil, G., 2002, destacan que, las localizaciones ideales para estaciones sísmicas pueden requerir de un helicóptero para llegar ahí. Desde que pocos sismólogos pueden pagar esos servicios, un acceso fácil al sitio de la estación es esencial para asegurar un mantenimiento a largo plazo (figura 2.10).



Figura 2.10. Ejemplo de acceso fácil a una estación remota vía caminos rurales, estación de Monte Oscuro, Azores, Portugal (foto cedida por Montalvo, A. 2018)

### **2.2.5. Ruido sísmico regional**

El análisis de fuentes de ruido sísmico naturales y antropogénicas que pueden ser consultadas en algunos mapas, es tan solo la primera etapa del estudio de ruido. Debe ser siempre seguido de un estudio de campo donde se registra el ruido. No obstante, fuentes naturales y antropogénicas como tráfico ferroviario y automóvil; industrias y minería; pedreras, áreas agrícolas, océanos, lagos, ríos, cascadas, etc., se pueden evaluar de forma cualitativa consultando mapas o a las autoridades locales (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

El ruido natural de fondo es dependiente de la frecuencia y sirve como limitador para las amplitudes menores que pueden ser medidas, que es típicamente 1 nm de desplazamiento a 1 Hz; mientras que el mayor desplazamiento está en el orden de 1 m. Esto representa un rango dinámico de  $10^9$ . La banda de frecuencias de interés, tienen también un rango grande, de entre  $10^{-5}$  hasta los 1000 Hz. El desafío es por tanto instrumental para construir un sensor y un digitalizador que cubran estas necesidades quiera de frecuencia quiera de rango dinámico (Havskov. J., Alguacil, G., 2002). Esto será de gran importancia para escoger los equipamientos adecuados cuando del estudio de sitio.

### **2.2.6. Telemetría y potencia de transmisión**

En la transmisión de datos pueden ser utilizadas diversas técnicas, desde líneas directas de transmisión vía cable o fibra óptica; líneas telefónicas o bien radioenlaces (radio telemetría) analógicos o digitales. Si la estación utiliza un radio para transmitir datos, comúnmente es instalada próxima del topo de una montaña. Comunicaciones satelitales no tienen esta limitación, pero utilizan mucha energía. Comunicaciones vía líneas de comunicación terrestre requieren una proximidad de la estación (HAVSKOV, J., ALGUACIL, G., 2002).

En relación a la radio telemetría debemos considerar la topografía de toda nuestra red sísmica en orden de conseguir diseñar nuestros radioenlaces. Para TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2012, mapas topográficos escalas 1: 50,000 y 1: 25,000 son los idóneos para este propósito, permitiendo determinar los radioenlaces más directos y con línea de vista para el centro de registro central, reduciendo el número de repetidores y las distancias de transmisión.

Un buen radioenlace tiene una línea de vista al centro de registro o al repetidor más próximo, y las distancias más cortas. Esto permite enlaces altamente eficientes y de un consumo de energía inferior; consideraciones importantes a tener en cuenta para estaciones remotas.

### **2.2.7. Uso de tierra, propiedad y uso futuro**

Durante el planeamiento de la red sísmica es de suma importancia clarificar la propiedad del terreno sobre la cual deseamos instalar una estación y saber si para tal terreno existen planes futuros. Esta información puede ser obtenida de las oficinas públicas dedicadas a la regulación de la tenencia de tierras y otras autoridades. Si el terreno es privado, deberá ser contactado el propietario a la brevedad posible y garantizar la renta, compra o donación del espacio para la estación mediante un contrato satisfactorio para ambas partes. En algunos países

esto puede ser muy importante para la seguridad del equipo instalado (TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

### 2.2.8. Condiciones climáticas

Parámetros climáticos severos pueden influenciar la selección de un sitio. Los servicios nacionales de meteorología pueden proveer información al respecto, principalmente en boletines anuales publicados por estas instituciones (figura 2.11). No son necesarios valores precisos de los parámetros meteorológicos y mismo con el mínimo de información puede ser suficiente para ayudar en la selección del sitio y el diseño del abrigo sísmico.



Figura 2.11. Ejemplo de mapa de climatología, lluvia acumulada promedio anual en México (<https://smn.conagua.gob.mx>, 2019).

Para TRNKOCKY, A., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009, los siguientes parámetros son importantes: variación de temperaturas para determinar el aislamiento necesario para materiales y equipamientos; la frecuencia y velocidad máxima del viento con la finalidad de reducir el ruido provocado por el mismo y la seguridad de las antenas de telecomunicaciones; información de radiación solar es necesaria para seleccionar el mínimo de paneles solares; frecuencia y cantidad de lluvia para determinar la protección necesaria del abrigo sísmico; en climas fríos los niveles de nieve para conocer los problemas de accesibilidad a la

estación; y la ocurrencia de tormentas eléctricas para dimensionar correctamente los diversos sistemas de protección contra descargas.

### **2.2.9. Energía**

En relación a la cuestión de energía, la potencia de un equipamiento puede variar entre 1 y 10 W dependiendo del tipo de estación. Estaciones con elevado consumo requieren acceso a la red eléctrica mientras que estaciones de bajo consumo pueden ser soportadas por paneles solares, en cuyo caso se deberá calcular el conjunto producción/almacenamiento (HAVSKOV, J., ALGUACIL, G., 2004).

Si no existe red eléctrica en el sitio, es necesario calcular la distancia sobre la cual nuevas líneas eléctricas deben ser tendidas y sus costos asociados. Si esto no es viable, o el costo es exorbitante, el costo y potencia de paneles solares y banco de baterías deberán ser calculados.

### **2.2.10. Seguridad**

Desafortunadamente, el vandalismo y los robos son comunes en algunas áreas más que en otras. No hace sentido alguno en instalar una buena estación de bajo ruido si los paneles solares y las baterías desaparecen en un par de semanas. Así siendo, además de hacer una construcción sólida de un abrigo sísmico (caseta sísmica), la localización geográfica puede ser importante para evitar estos problemas

(Havskov, J., Alguacil, G., 2002).

La construcción de un abrigo sísmico tiene restricciones particulares de diseño, de las cuales, solo se mencionan las relacionadas con la seguridad. La construcción deberá ser de preferencia en materiales difíciles de penetrar, de preferencia en concreto armado desde que las condiciones del suelo lo permitan (figura 2.12.a). Debe tener dos orificios para ventilación y pasaje de cables, ambas debidamente vedadas para insectos y no para viento. La puerta de acceso será metálica con cerraduras de seguridad y llaves telescópicas (figura 2.12.b). De ser posible, una

cerca exterior circundara el abrigo, pero se recomienda solo para sitios poco ventosos o próxima de núcleos urbanos (figura 2.12.c).

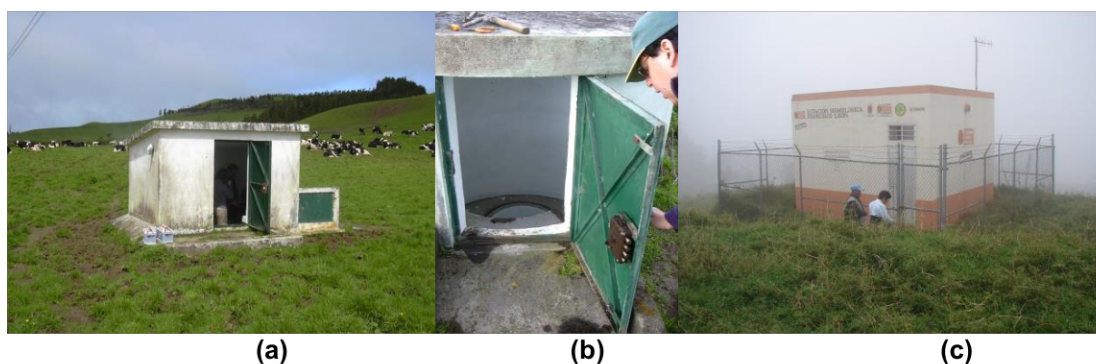


Figura 2.12. Aspectos generales de un abrigo sísmico. (a) Estación sísmica con bloques de cemento, (b) pormenor de una puerta metálica con cerradura de seguridad y (c) cercado exterior (fotos cedidas por Montalvo, A., 2018).

### 2.2.11. Geología del sitio

Es bien conocido que un sensor en suelo suelto es más ruidoso que uno en localizado en roca sólida, luego entonces el suelo suelto debe ser siempre evitado (Havskov, J., Alguacil, G., 2002). La litología, parte de la geología que estudia las características de las rocas que constituyen una determinada formación, permite distinguir las características físicas y químicas de los sitios potenciales para la implementación de estaciones sísmicas.

Las propiedades físicas de constante de elasticidad, densidad, relación de Poisson y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas son parámetros relevantes en lo que toca a la determinación de los sitios de interés para la instrumentación sísmica.

La tabla I. presenta los valores promedios de las propiedades físicas de las rocas para distintos periodos geológicos y rocas ígneas/plutónicas.

Tabla I – Valores típicos (promedio y aproximados) de las constantes de elasticidad, densidad, relación de Poisson y velocidades de ondas sísmicas para algunos materiales seleccionados (adaptado de Bormann, P., *et al.*, in Bormann, P., Ed. 2009).

Material o Formación Geológica	Módulo de Volumen En $10^9$ Pa	Módulo de Corte En $10^9$ Pa	Densidad En $\text{Kg m}^{-3}$	Relación de Poisson	Vp En $\text{Km S}^{-1}$	Vs En $\text{Km S}^{-1}$	Vp / Vs
Aire	0.0001	0	1.0	0.5	0.32	0	$\infty$
Agua	2.2	0	1000	0.5	1.5	0	$\infty$
Roca sedimentaria Clástica					(1.4-5.3)		
Arenisca	24	17	2500	0.21	4.3	2.6	1.65
Sal	24	18	2200	0.17	4.6 (3.8-5.2)	2.9	1.59
Caliza	38	22	2700	0.19	4.7 (2.9-5.6)	2.9	1.62
Granito	56 (47-69)	34 (30-37)	2610 (2340-2670)	0.25 (0.20-0.31)	6.2 (5.8-6.4)	3.6 (3.4-3.7)	1.73 (1.65-1.91)
Basalto	71 (64-80)	38 (33-41)	2940 (2850-3050)	0.28 (0.26-0.29)	6.4 (6.1-6.7)	3.6 (3.4-3.7)	1.80 (1.76-1.82)
Peridotita, Dunita y Piroxenita	128 (113-141)	63 (52-72)	3300 (3190-3365)	0.29 (0.26-0.29)	8.0 (7.5-8.4)	4.4 (4.0-4.7)	1.8 (1.76-1.91)
Rocas Metamórficas e Igneas					(3.8-6.4)		
Rocas ultramáficas					(7.2-8.7)		
Cenozoico			1500-2100	0.38-<0.5	(0.2-1.9)		2.3 - 8
Agua Cenozoica saturada			1950	0.48	1.7	0.34	5
Cretácico y Jurásico			2400-2500	0.28-0.43			1.8 - 2.8
Triásico			2500-2700	0.28-0.40			1.8 - 2.5
Pérmico Superior			2000-2900	0.23-0.31			1.7 - 1.9
Carbonífero				0.31-0.35			1.9 - 2.1

### 2.2.12. Otros

Según Montalvo, A. (2018), en comunicación personal, existe más un par de criterios a considerar, la exposición del sitio de la estación a los peligros naturales y la seguridad del personal técnico que instala o da mantenimiento a las estaciones. En el caso particular del estado de Chiapas, los conflictos sociales deben siempre considerarse.

### **3. METODOLOGIA APLICADA A LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO**

#### **3.1. Enfoque epistémico de la investigación**

Con el paso del tiempo, la historia de la ciencia ha tenido diversas corrientes de pensamiento tales como: el Empirismo, el Materialismo Dialéctico, el Positivismo, la Fenomenología y el Estructuralismo (Hernández, S., 2010). Para este proyecto de investigación se utilizó la corriente de pensamiento positivista; el cual se origina en la obra de Auguste Comte (1798 – 1857) y Emile Durkheim (1858 – 1917), ya que en ella proponen que el estudio de los fenómenos sociales requiere ser “científico”; siendo susceptible a la aplicación del mismo método científico que se utilizaba con éxito en las ciencias naturales. Ya que ellos consideraban que todas las cosas o fenómenos pueden medirse (Hernández, S., 2010).

#### **3.2. Tipo de Investigación**

Siendo así, el presente trabajo de investigación utilizó un enfoque cuantitativo; esto debido a que dicho enfoque es secuencial y probatorio; así como también usa la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías (Hernández, S., 2010). Además, las hipótesis se establecen previamente, esto es, antes de recolectar y analizar los datos. La recolección de los datos se fundamenta en la medición y el análisis en procedimientos estadísticos (Hernández, S., 2010).

#### **3.3. Alcance de la investigación**

El alcance de la investigación de acuerdo a la revisión bibliográfica y la perspectiva del estudio es: Exploratorio y Correlacional; ya que los estudios exploratorios como lo cita Hernández S. 2010, *“sirven para preparar el terreno y por lo común anteceden a investigaciones con alcances descriptivos, correlacionales o explicativos”*; por lo cual en la presente investigación, se efectuó una revisión bibliográfica y cartográfica de la información sobre el o los casos de estudio, con lo que se obtiene un bosquejo general de las características y tipos de variables que se encuentran.

Y así mismo, los estudios correlacionales, asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población (Hernández, S., 2010). Teniendo como finalidad conocer la relación o el grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables.

Los estudios correlacionales, al evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, miden cada una de ellas (presuntamente relacionadas) y, después, cuantifican y analizan la vinculación. Tales correlaciones se sustentan en hipótesis sometidas a prueba (Hernández, S., 2010).

En base a lo que comenta el autor, esta investigación contemplo el tipo correlacional debido a que las variables cartográficas a utilizar, tendrán un valor relacionado a una característica.

#### **3.4. Diseño de la Investigación**

El diseño de la investigación fue del tipo experimental debido a como lo plantea Hernández, S. 2010, *“un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas-antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos-consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador”*.

Dicho diseño, es un modelo matemático espacial, que utiliza fórmulas matemáticas para interrelacionar todas las variables en ella, obteniendo a si un resultado basado en los Sistemas de Información Geográfica.

### **3.5. Tipo de Variables utilizadas**

Las variables utilizadas en dicho diseño son independientes y dependientes, esto debido a que se manipularan las variables independientes teniendo un efecto en la variable dependiente.

En este caso el procedimiento no es mecánico, ni en base a fórmulas de probabilidad, sino de la toma de decisiones del investigador, así también la muestra es del tipo espacial siendo el espacio geográfico del área de interés. Para la generación de un modelo multicriterio, que permitirá la toma de decisiones para la localización de potenciales sitios para instalar una red sísmica, se utilizar las siguientes capas de información y datos: fallas y fracturas, distancia a ríos, carreteras y caminos; vegetación y uso de suelo, litología, orografía, densidad de sismos, telemetría y zonas sismo-génicas; otras capas pueden ser incorporadas de ser necesario. Cada una de estas muestras se clasificará en 3 clases para al final matemáticamente multiplicar y obtener un resultado.

### **3.6. Instrumento Metodológico**

La investigación emplea una metodología experimental, con múltiples técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta para la captura, construcción y gestión de una base de datos digital. Posteriormente, se integraron con dichos métodos las Técnicas de Evaluación Multicriterio (MCDA), dando un carácter cuantitativo a las evaluaciones realizadas.

De acuerdo a Fernández A., 2014 *“El análisis multicriterio (AMC) es un método que permite orientar las decisiones a partir de varios criterios comunes”*. Siendo éste, un método práctico para la resolución de problemas o evaluación de proyectos; es utilizado para realizar un juicio comparativo entre opciones de solución hacia el problema.

Este método implica de acuerdo a Malczewski J., 1999 *“implican seis componentes:*

1. *Una meta o un conjunto de metas que el encargado de decisiones (grupo de interés) intenta conseguir;*
2. *El tomador de decisiones del grupo de tomadores de decisiones implicados en el proceso de toma de decisiones a lo largo de sus preferencias con respecto a los criterios de evaluación;*
3. *Un conjunto de criterios de evaluación (objetivos y / o atributos) sobre la base de los que los tomadores de decisiones evalúan cursos de acción alternativos;*
4. *El conjunto de alternativas de decisión, esas, las variables de decisión o de acción;*
5. *El conjunto de variables no controlables. O estados de naturaleza (medio ambiente de decisión); y*
6. *El conjunto de resultados o consecuencias asociadas con cada alternativa-par de atributo”. Teniendo como el principal objetivo, alcanzar una solución mediante la simplificación del problema, utilizando la información obtenido por los distintos actores y respetando en todo momento sus preferencias.*

De esta forma, teniendo como referencia los diferentes criterios y valores, los decisores pueden integrar la diversidad de las opiniones relativas a los proyectos para emitir un juicio.

La decisión multicriterio espacial implica un conjunto de alternativas (eventos) geográficamente definidas en las que se realiza una elección de una o más alternativas (su ordenación realizada) con respecto a un conjunto dado de criterios

de evaluación. Las alternativas se definen geográficamente en el sentido de que los resultados del análisis (decisiones) dependen de su disposición espacial (figura 3.1). En la terminología de SIG, las alternativas son una colección de objetos de puntos, líneas y áreas (polígonos), que se adjuntan a los cuales son valores de criterio (Malczewski J., 1999).

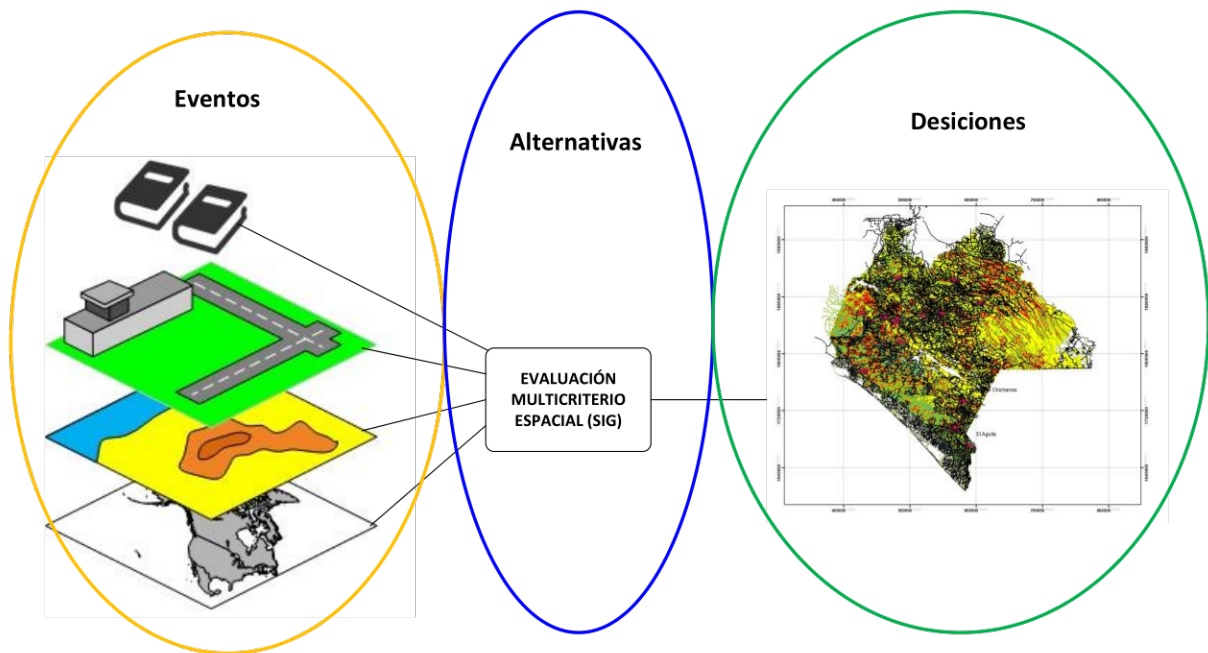


Figura 3.1. Diagrama de diseño multicriterio Espacial (adaptado de Malczewski J., 1999)

El análisis multicriterio espacial requiere datos sobre los valores de los criterios y las ubicaciones geográficas de las alternativas. Los datos se procesan utilizando técnicas GIS y AMC para obtener información para tomar la decisión. Por lo tanto, los términos análisis de decisión multicriterio basado en SIG y análisis multicriterio espacial se utilizarán indistintamente.

El análisis multicriterio espacial se puede considerar como un proceso que combina y transforma datos geográficos (entrada) en una decisión resultante (salida). Los procedimientos implican la utilización de datos geográficos, las preferencias del tomador de decisiones y la manipulación de los datos y las preferencias de acuerdo con las reglas de decisión especificadas. Agregan datos e información geográficos multidimensionales en valores unidimensionales de

decisiones alternativas. El aspecto crítico del análisis multicriterio espacial es que involucra la evaluación de eventos geográficos basados en los valores de criterio y las preferencias del tomador de decisiones con respecto a un conjunto de criterios de evaluación.

En consonancia con la bibliografía consultada, descrita en el marco teórico, el método se divide en tres grandes fases: la primera es la recopilación de los datos cartográficos, estudios anteriores y la construcción de una base de datos digital, incluyendo las transformaciones necesarias para variables espaciales.

La segunda fase incluye las actividades desarrolladas para la evaluación de las variables incluidas y la consulta de especialistas; esto debido a la falta de criterios bibliográficos para definición de parámetros limitantes; y se genera un modelo de evaluación multicriterio. Finalmente, en la tercera fase se realizan labores de verificación en terreno, no implementadas en el presente trabajo de tesis debido a ser parte de los estudios de campo y no de gabinete.

### **3.6.1. Primera Fase: Recopilación de Información Base.**

La diversa información cartográfica, temática y estadística debe ser recopilada en instituciones oficiales (figura 3.2). Dicha información no puede ser directamente procesada en un modelo multicriterio de evaluación, debiéndose primero el tratamiento previo mediante la **determinación de variables** de evaluación, definición de las **restricciones asociadas**, el procesamiento de **rasterización de las bases digitales de datos** y la **definición de las alternativas** también de evaluación.

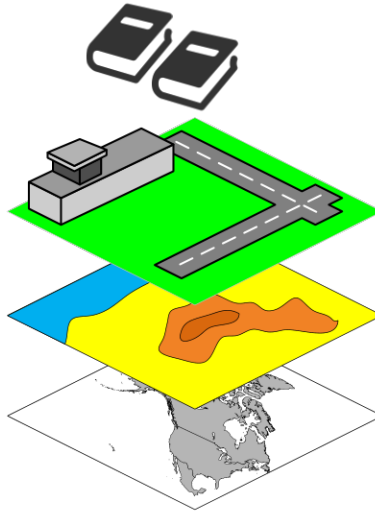


Figura 3.2. Capas de información geográfica obtenidas de instituciones oficiales.

- **Determinación de las variables:** Las variables deben cumplir con las condiciones de representatividad espacial, así siendo, se proponen los tipos de roca en capa Litología (Velocidad de Onda P), la distancia a las fallas y fracturas (ley de atenuación de ondas sísmicas), distancia a caminos (ruido sísmico), vegetación y uso de suelo (agrícola, destinado a habitación etc.), topografías (tipo de geoforma del terreno), distancia a ríos (ruido sísmico) y densidad de sismos (concentración de eventos).
- **Definición de las restricciones asociadas:** Corresponden a un cierto tipo de criterio que restringe en forma permanente la disponibilidad del sitio para la evaluación de las alternativas (Barredo, J., 1996). Las restricciones asociadas se delimitan por la distancia a cursos de agua, la litología poco consolidada, la ocupación de suelos agrícolas productivos, la proximidad de los sitios a los centros urbanos y sectores poblados; y la proximidad a caminos.
- **Rasterización de la base de datos digital:** El modelo de capacidad de acogida se genera en formato ráster. Así siendo es necesario efectuar la transformación de las coberturas de otros formatos a este tipo particular.
- **Definición de las alternativas:** Las alternativas están representadas por objetos o unidades espaciales, las cuales representan un sitio individual,

constituyendo así el conjunto global de alternativas de selección. Se definen las clases temáticas (o alternativas de selección) en cada criterio de la construcción del modelo:

- a) **Litología:** se agruparon los diferentes tipos de roca de acuerdo con la clasificación que describe el *New Manual of Seismological Observatory Practice* – NMSOP (Bormann, P., Ed., 2009) descrito en subcapítulo 2.2.11, que relaciona tipos de roca de acuerdo con su impedancia (velocidad de la onda P), definiéndose tres categorías de mayor a menor impedancia como No apto, Poco Apto y Apto (figura 3.2.).
- b) **Distancia a Fallas y Fracturas:** se utiliza la herramienta *buffer* para definir 3 clases de relación distancia a falla o fractura; considerando impropio instalar un sensor sísmico cercano a un tipo de estructura mencionada. Las tres clases definidas fueron: No apto ( $d \leq 100$  m), poco apto ( $100 \geq d \leq 250$  m) y apto ( $250 \geq d \leq 500$  m o incluso superior).
- c) **Caminos:** se utiliza la herramienta *buffer*, para generar 3 clases de distancias desde la distribución de caminos. Las clases son idénticas a las utilizadas en la distancia a fallas y fracturas.
- d) **Ríos:** se utiliza la herramienta **buffer** para generar tener 3 clases de distancias desde la distribución de escurrimientos permanentes. Clases resultantes No apto ( $d \leq 50$  m), poco apto ( $50 \geq d \leq 100$  m) y apto ( $100 \geq d \leq 250$  m o incluso superior).
- e) **Vegetación y uso de suelo:** se clasifican los usos de suelo en tres clases no apto (usos agrícolas, comerciales, urbanos, cuerpos de agua), poco apto (vegetación secundaria y remanentes de vegetación) y apto (vegetación primaria).
- f) **Geoformas:** se clasifican en tres tipos de clases: no apto (Valles, pie de monte), poco apto (Planicies) y apto (Lomeríos y Montañas).

g) **Densidad de Sismos:** a partir de la información de epicentro/magnitud disponible en catálogos sísmicos, se genera un mapa de densidades con la herramienta *Spatial Analyst*. Se obtiene una capa tipo ráster que identifica las zonas con mayor liberación de energía sísmica. Se determinan 3 tipos de clases: no apto (baja energía sísmica), poco apto (media liberación de energía) y apto (elevada energía sísmica).

- **Inclusión de las Restricciones:** Las restricciones representan las alternativas que contienen solo dos valores numéricos: el código 1, indica aquel lugar candidato para cierta actividad y el valor 0, que indica la anulación total de dicho sector para la actividad evaluada; que, para el caso de nuestro método, se el valor 1 es las zonas o lugares aptos y el valor 0 es el lugar no apto y poco apto. Ejemplo lugares ríos perenes y cuerpos de agua permanentes.

### **3.6.2. Segunda Fase, técnicas de evaluación multicriterio.**

Para aplicar estas técnicas, en el ámbito de SIG, se requiere que cada variable o factor temático sea estructurado como una matriz, en la cual los criterios ocupan las filas de la matriz y las alternativas propias de cada criterio ocuparan las columnas. En el presente estudio, se utilizó el Método de las Jerarquías Analíticas (MAJ) propuesto por Saaty (Saaty T., 1980).

La finalidad es comparar la importancia de cada uno de los factores sobre cada uno de los demás, para posteriormente determinar el eigenvector principal, el cual establece los pesos; y el eigenvalor, que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores. La asignación de los juicios de valor fue realizada apoyándose en la opinión y entrevistas con expertos en el tema del estudio.

de evaluación se realiza con recurso a algebra de mapas. Esta herramienta es práctica y eficaz en la correlación de información, Los resultados de esta acción representan la validación o no de una determinada área en la capa

Como producto final se obtiene el modelo de evaluación multicriterio para los estudios de gabinete para el diseño de redes sísmicas, el cual puede ser implementado a nivel global para reducir los tiempos y costos en el diseño. En la figura 3.6 se observa el modelo en diagrama de bloques y al cual se le incorporó un proceso extra que relaciona los ráster de telemetría para reducir los puntos necesarios para estaciones sísmicas.

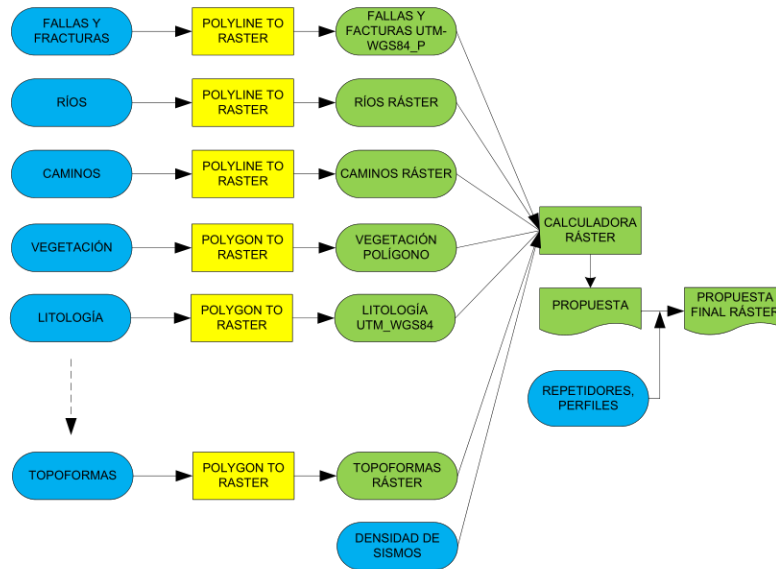


Figura 3.3. Modelo multicriterio para la selección de sitios de interés para nuevas estaciones sísmicas, trabajo de gabinete.

## 4. Caso de estudio Chiapas, México

### 4.1. Motivación

México es un país con elevada actividad sísmica y volcánica debido a su particular encuadramiento geotectónico, dominado por la interacción de cinco placas tectónicas como se presenta en la figura 4.1. La mayor parte del territorio nacional asienta en la placa norteamericana, en cuanto que el restante territorio se sitúa en las placas del Pacífico (península de Baja California) y del Caribe (sureste del estado de Chiapas). La placa norteamericana interactúa con las placas de Cocos y Rivera formando zonas de subducción que, por su vez, son responsables por sismos de magnitud elevada en estas regiones (<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx>, consultado 2019).

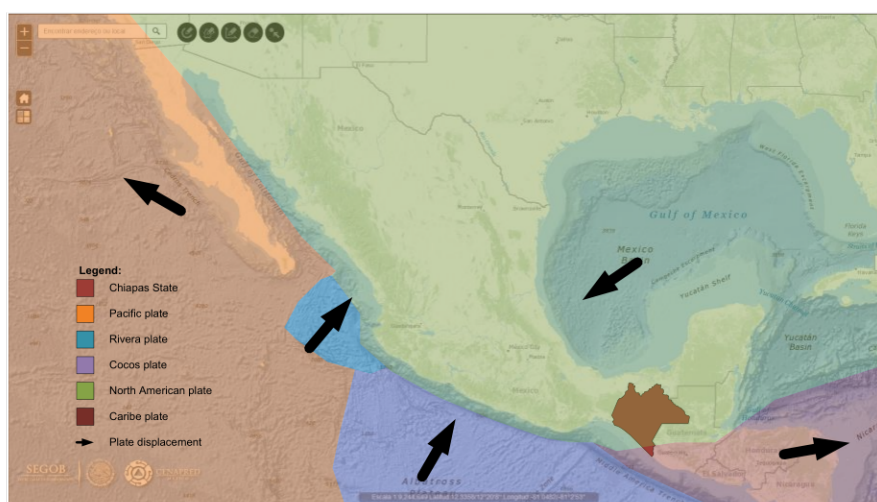


Figura 4.1. Ambiente geotectónico mexicano, modificado de Atlas nacional de Riesgos ([www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx](http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx), 2017).

Fruto de este ambiente geotectónico, y durante el año de 2018, el Servicio Sismológico Nacional (SSN), en su catálogo anual de sismos fuertes, registró un total de 30,196 sismos de diversas magnitudes (figura 4.2.a). La zona de subducción formada por la interacción de las placas, antes mencionadas, son responsables por la mayoría de los eventos sísmicos, siendo la región sur-sureste del país la más afectada; esta interacción resulta en un elevado riesgo sísmico

como se presenta en la figura 4.2.b; y localización del área de estudio, el estado de Chiapas.

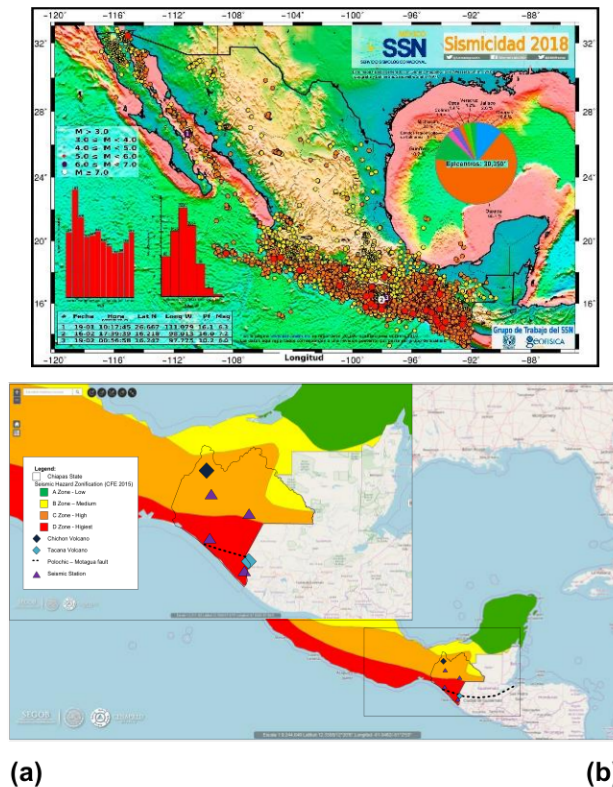


Figura 4.2. (a) Sismicidad en México, 2018 ([www.ssn.unam.mx](http://www.ssn.unam.mx), 2019) y (b) Mapa de zonificación sísmica, estado de Chiapas, modificado ([www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx](http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx), 2017)

Sirva de ejemplo el sismo destructivo de septiembre 7 de 2017, magnitud 8.2 con epicentro a 140 km al suroeste de la ciudad de Pijijiapan; causando la muerte a 16 personas, afectando 97 municipios (de 122) y 1'072,239 viviendas tan solo en el estado de Chiapas (Sistema Integral de Protección Civil, SIPC, 2017).

A pesar de su elevado nivel de riesgo sísmico poca instrumentación ha sido desplegada y ningún sistema de alerta temprana ha sido implementado (*Earthquake Early Warning System* EEWS), resultando en falta de información para la toma de decisiones en materia de Protección Civil y recursos para la investigación científica. Así siendo, impera la necesidad del diseño, implementación y operación de una red de vigilancia quiera sísmica quiera volcánica con capacidades de alerta (EEWS) en el estado.

Con el objetivo principal de solventar esta necesidad estatal se propone, en una primera fase, en el presente trabajo de tesis se realizó un estudio de gabinete (*off-site study*) para el diseño de una red de monitoreo sísmico tectónico y volcánico que satisfaga los requerimientos de vigilancia y, eventualmente, de alerta sísmico. Trabajos posteriores a esta tesis cubrirán los estudios de sitio y la implementación de una red sísmica.

## **4.2. Aplicación de la metodología, modelo de evaluación multicriterio**

### **4.2.1. Recopilación de Información Base**

Se recopiló información cartográfica, temática y estadística, generada por los estudios realizados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), Comité de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG), el Instituto de Protección Civil para la Gestión Integral de Riesgos (IPCGIR) y el Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGIRCC) (figura 4.3).

En el presente trabajo de tesis se obtuvieron y utilizaron las siguientes capas y metadatos GIS:

- Fallas y Fracturas del estado;
- Distancia a Ríos;
- Caminos de Chiapas;
- Vegetación y Uso de Suelo de Chiapas;
- Litología del estado de Chiapas;
- Orografía del estado de Chiapas;
- Densidad de Sismos en el estado;
- Repetidores de radio del estado de Chiapas.

La tabla II presentan los institutos oficiales y las diversas capas o en formato GIS.

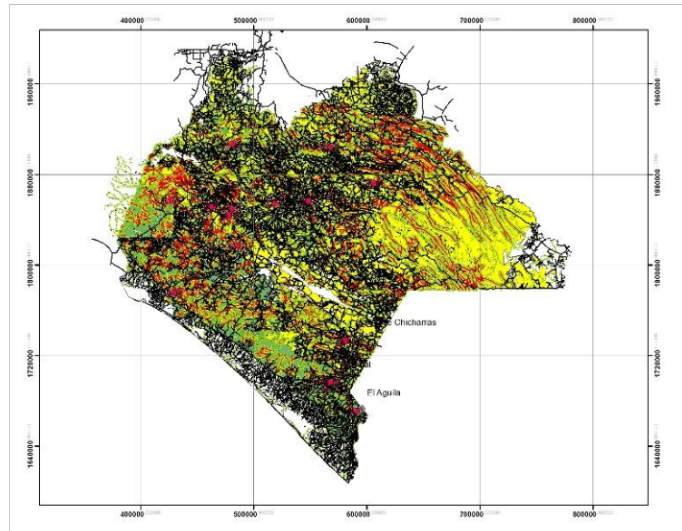


Figura 4.3. Capas de información geográfica recopiladas de instituciones oficiales.

Tabla II – Información recopilada para el presente trabajo de gabinete.

Sitio Oficial	Sitio Oficial	Tipo de Información
Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	<a href="http://www.inegi.org.mx">www.inegi.org.mx</a>	Geología, uso de suelo, fallas y fracturas, modelo de elevación, escurrimientos, otros
Servicio Sismológico Nacional (SSN)	<a href="http://www.ssn.unam.mx">http://www.ssn.unam.mx</a>	Catálogo sísmico instrumental 1900 – 2017 (todas las magnitudes)
Comité de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG)	<a href="http://www.ceieg.chiapas.gob.mx">www.ceieg.chiapas.gob.mx</a>	Caminos (total)
Instituto de Protección Civil para la Gestión Integral de Riesgos (IPCGIR)	Oficinas de Monitoreo	Localización de puntos de repetición voz y datos de Protección Civil Chiapas
<i>World Organization of Volcano Observatories</i>	<a href="http://www.wovo.org">www.wovo.org</a>	Localización de estaciones sísmicas de los volcanes Tacana y Chichón

Se efectuó una clasificación por tipos de roca (impedancia sísmica), distancia a fallas tectónicas, las características del suelo (vegetación, uso presente y futuro), las formas geológicas, la densidad de sismos y la distancia a ríos o cuerpos de

agua; tal y como descrito en la bibliografía. Fueron así creadas nuevas capas ráster para facilitar la operación matemática que sirve para la evaluación de las mismas.

Al mismo tiempo, capas relacionadas con cuerpos de agua, suelos agrícolas o para urbanización y caminos fueron utilizadas como valores de restricción (0), eliminando vastas áreas inadecuadas para la implantación de estaciones sísmicas (figura 4.4).

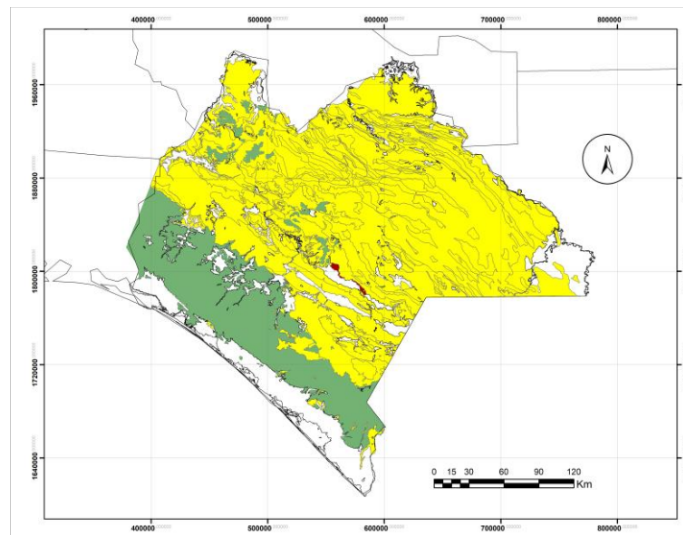


Figura 4.4. Mapa de litología y restricciones de cuerpos de agua de Chiapas. Tres categorías: blanco exclusión, verde apto, amarillo poco apto y rojo no apto.

Las alternativas, derivadas de las unidades espaciales de las capas no restrictivas, recibieron sus respectivas clases temáticas y valores de delimitación, en números de tres definidas como Apto (3), No Apto (1) y Poco Apto (2); generando así las matrices necesarias (y ráster) para la evaluación mediante el modelo (figura 4.5).

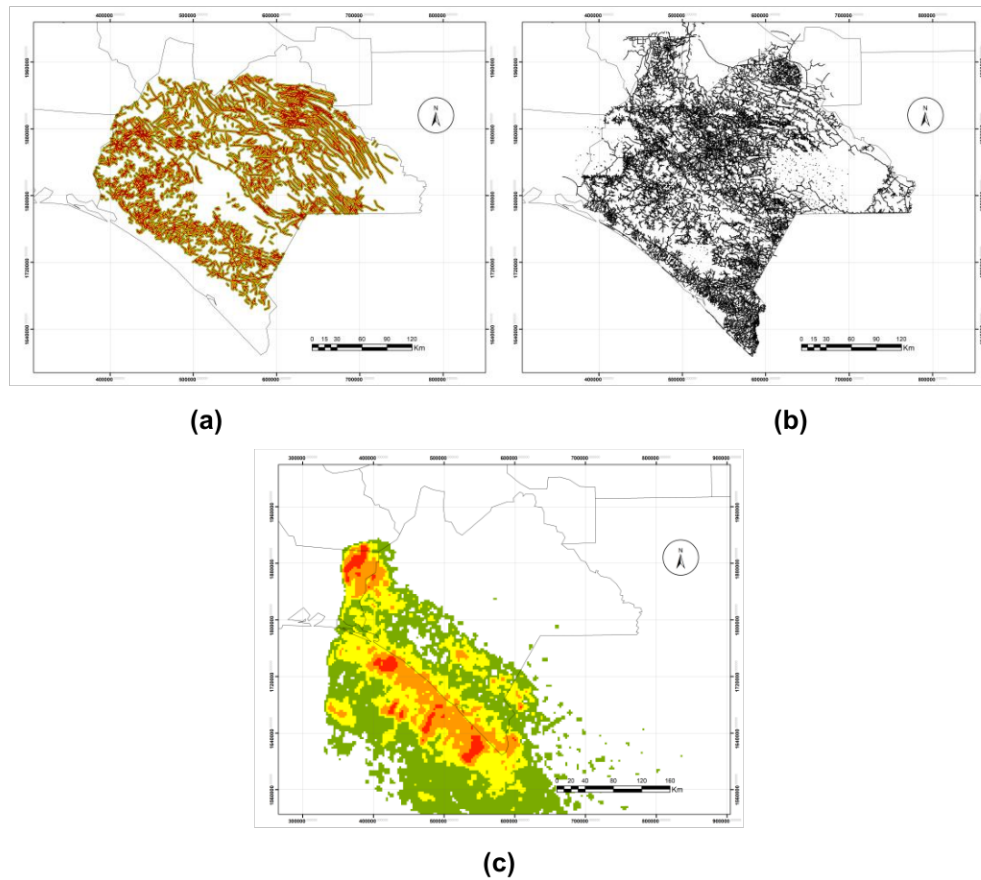


Figura 4.5. Ejemplo de mapas temáticos con variables matriciales para la operación matemática del modelo. (a) Mapa de clases de distancias a fallas y fracturas, (b) mapa de carreteras y caminos de Chiapas; y (c) mapa de densidad de sismos 1900-2017 (INEGI, 2018).

De acuerdo a la información obtenida por las diferentes fuentes y sus respectivos ráster y matrices, fue experimentado el modelo multicriterio GIS; cuyas primeras corridas resultaron en total de 599 sitios de interés como se presenta, a negro, en la Figura 4.6.

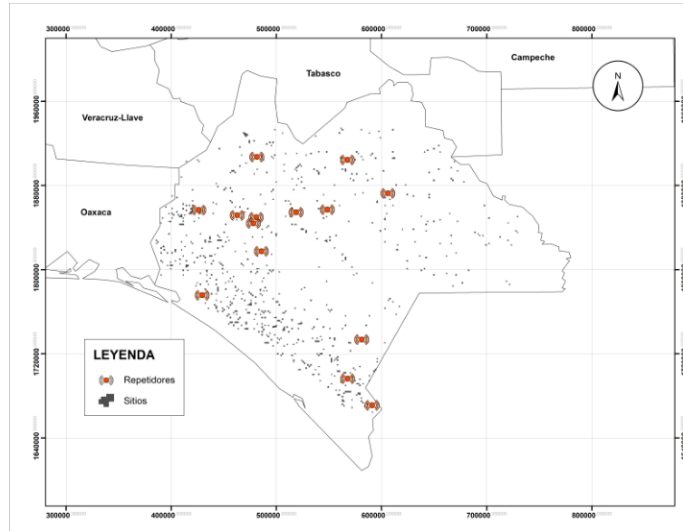


Figura 4.6. Primeras ejecuciones del modelo, resultado 599 puntos de interés.

Esta cantidad de sitios de interés no es un valor del todo manejable siendo necesario, y de acuerdo al modelo propuesto, la implementación de primer filtro; consiste en realizar un radio de influencia de 15 Km a los puntos de repetición del Sistema Estatal de Protección Civil, valores sugeridos por Montalvo A., 2018, comunicación personal, por experimentación con radios digitales WiFi de 5 GHz. Como resultado se obtienen un total de 121 sitios (en azul) (Figura 4.7) que cumplen con ese nuevo criterio de filtraje, eliminando así un total de 478 sitios.

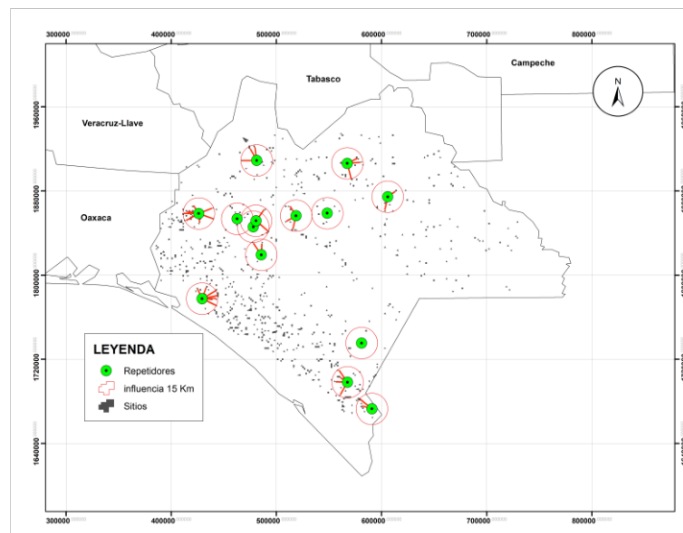


Figura 4.7 Sitios que cumplen con el criterio de radio de 15 Km al repetidor más próximo.

Posteriormente, se realiza un segundo filtro a estos resultados tomando en consideración las condiciones del terreno. Cada sitio es evaluado para la línea de vista entre el sitio de interés y la antena más próxima. Utilizando un Modelo Digital de Elevación se efectúan los perfiles elevación para los 121 sitios de interés anteriores como se muestra en la figura 4.8.

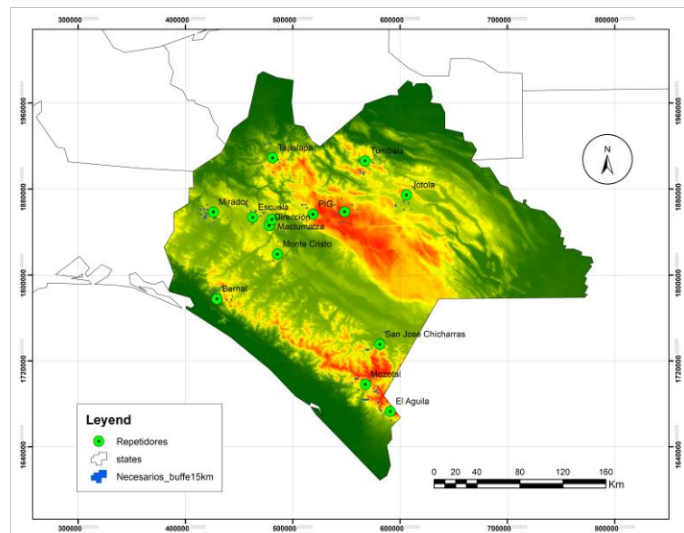


Figura 4.8 Perfiles de línea de vista aplicado a sitios de interés.

Como resultado, y con la aplicación del modelo y filtros de telemetría, de los 599 sitios de interés iniciales se obtienen 42 (figura 4.9). Este número es mucho más manejable que los 121 resultantes del primer filtraje; permitiendo una mejor gestión de los recursos quiera logísticos quiera técnicos quiera económicos. No en tanto, se observan zonas de sombra (falta de sitios de interés) debido a la falta de infraestructuras de comunicación. Este problema puede ser solventado incorporando al modelo “filtros” de telemetría de Internet en puntos de acceso pública y privada.

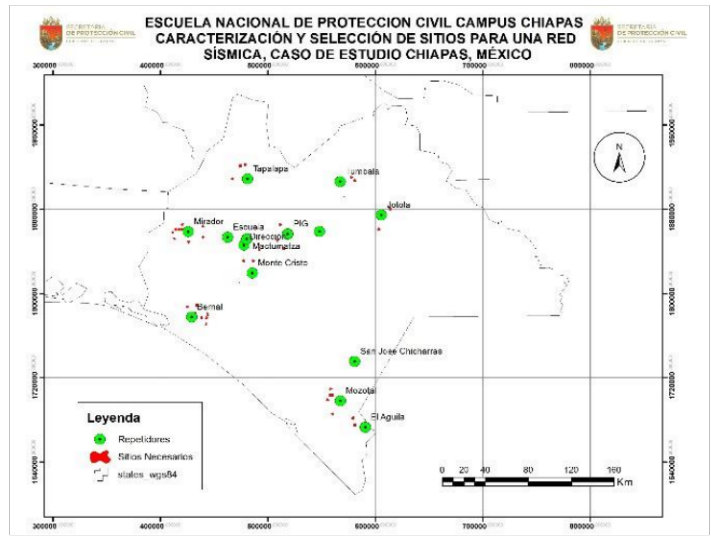


Figura 4.9. Mapa resultante de la ejecución del modelo GIS de evaluación multicriterio y filtros de telemetría; 42 sitios de interés para la instalación de estaciones sísmicas.

## 5. RESULTADOS Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1. Resultados y discusión

Como mencionado en el capítulo anterior y consonante con la información obtenida en las diferentes fuentes de información cartográfica, se realizó un análisis previo y una estandarización de valores para así poder correr el modelo propuesto. Las pruebas/ejecuciones del modelo, el análisis y la interpretación de los resultados prueba, se obtuvo un mapa con 599 polígonos/puntos de interés que cumplen los requisitos sugeridos en la bibliografía (Figura 5.1).

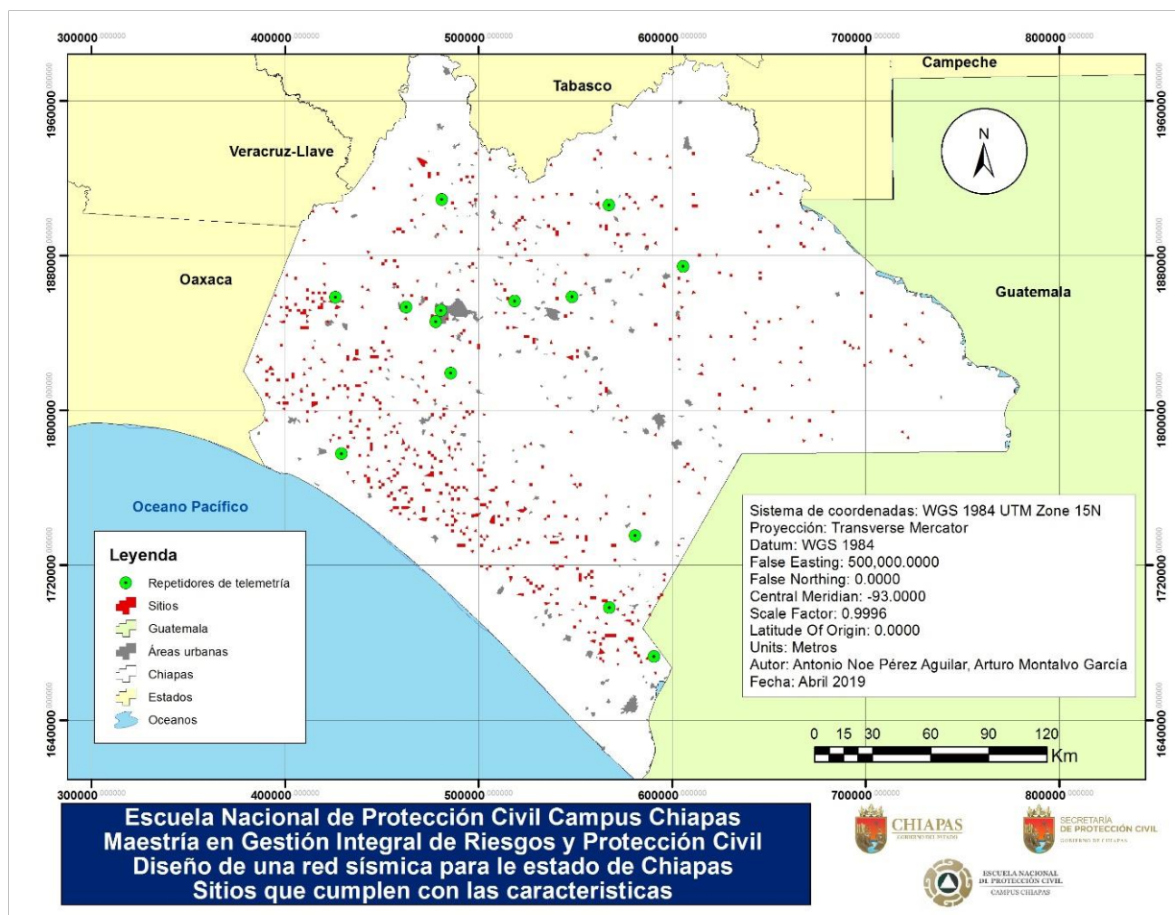


Figura 5.1. Mapa de polígonos o puntos de interés para la instalación de una red sísmica, primeras pruebas del modelo.

La cantidad resultante de estas pruebas es un número irrealista para proceder a su visita y validación. Así siendo, y considerando la necesidad de datos en tiempo casi real, es necesario considerar la telemetría; por lo tanto, se implementó un filtro de telemetría considerando la proximidad de infraestructuras de telecomunicación, resultando en una segunda prueba que arroja 121 puntos (figura 5.2), eliminando 478 por su imposibilidad de tener acceso facilitado a comunicaciones independientes.

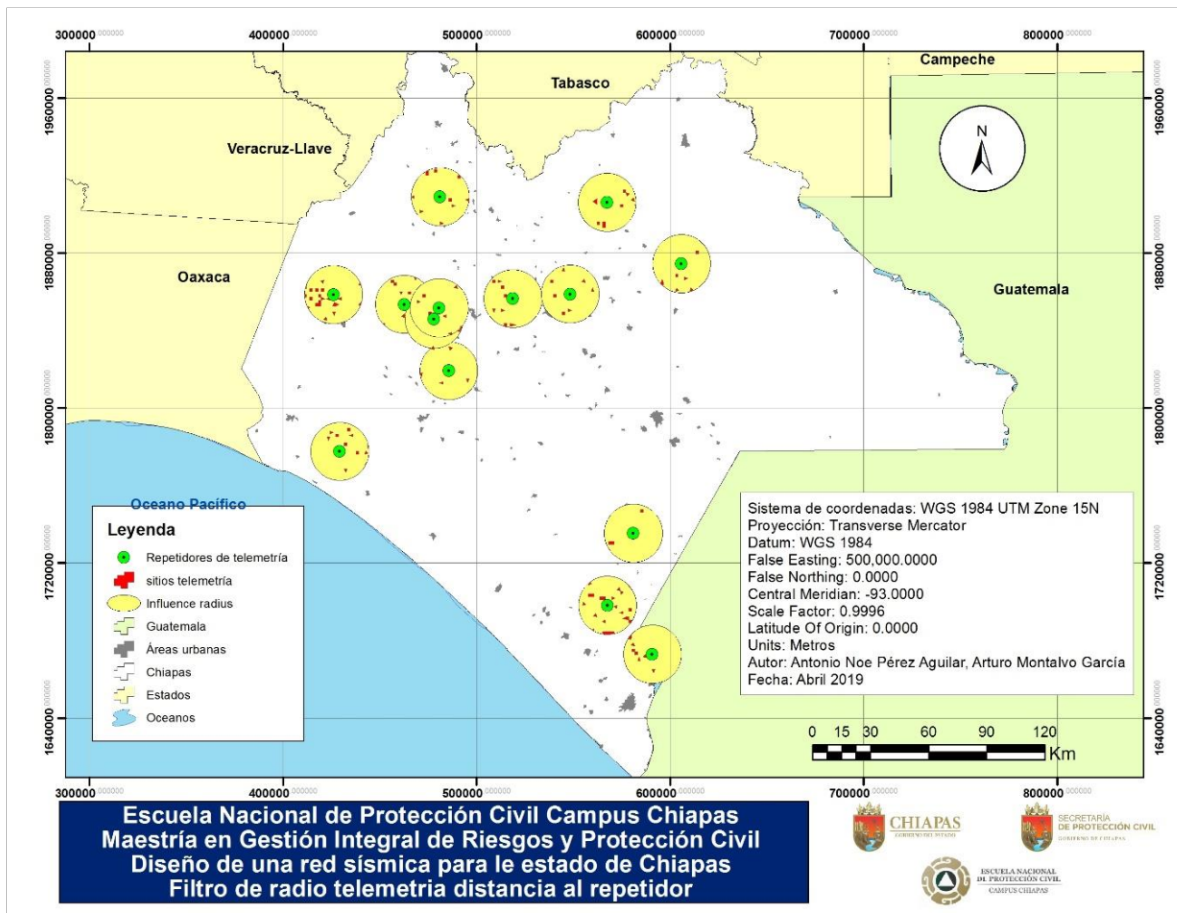


Figura 5.2. Sitios que cumplen con el criterio proximidad a repetidor.

A pesar de este número ser manejable, el recurso quiera logístico quiera económico sería elevado. Para reducir esto, se utilizaron herramientas de GIS que permiten considerar los perfiles de visión, que son esenciales para el trazado de enlaces de radio comunicación. Con este nuevo filtro aplicado, las pruebas y subsecuentes corridas del modelo, revelan un total de 42 sitios de interés para la

red sísmica de Chiapas (figura 5.3). En la parte final de la presente tesis, se encuentra un mapa de 90 x 60 cm con una mejor resolución.

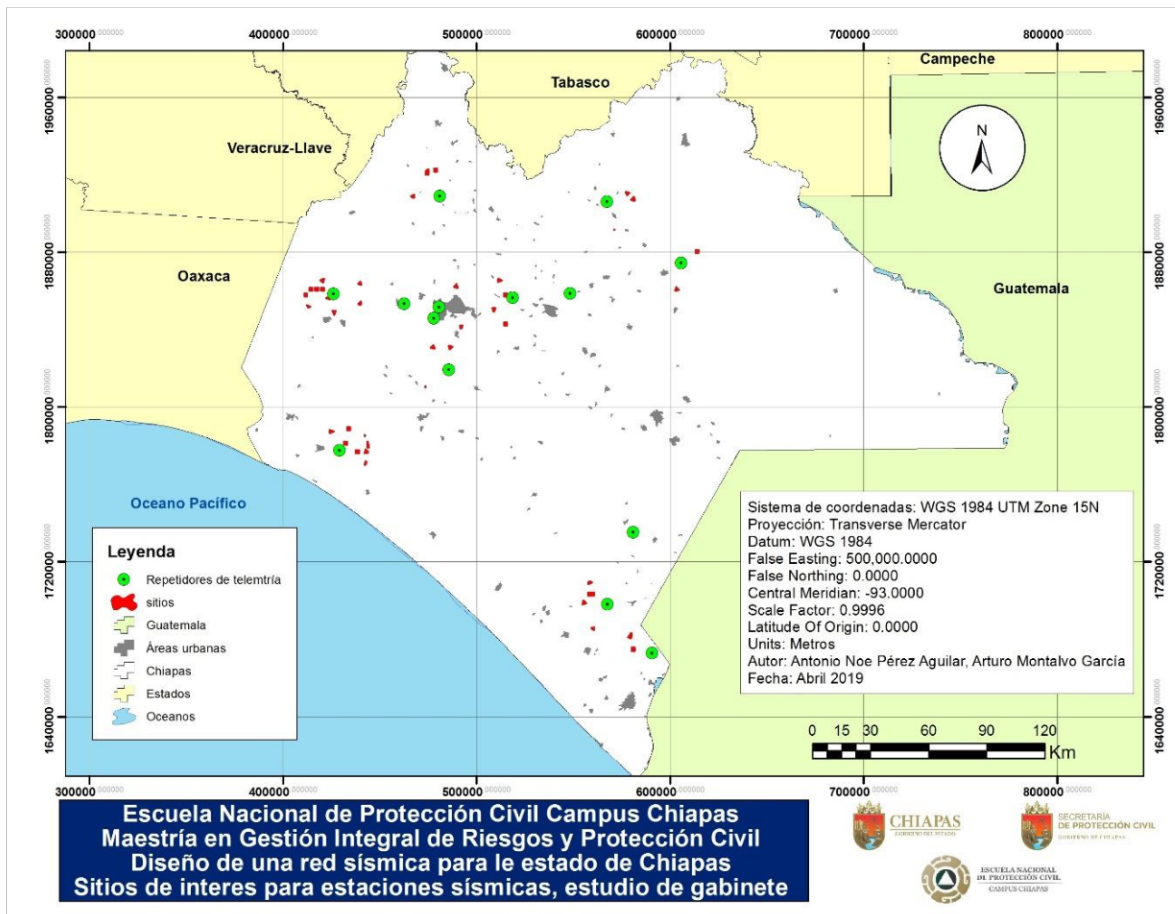


Figura 5.3. Mapa final, 42 sitios de interés para instalación de estaciones sísmicas, estudio de gabinete.

## 5.2. Trabajos futuros

Si bien la presente investigación nos arrojó un resultado favorable para 42 sitios de interés para la instalación de estaciones sísmicas, es necesario caracterizar las condiciones de los diferentes sitios para tener un mejor resultado en el registro sísmico.

Como trabajos futuros, a corto plazo, se pretende incluir en el modelo una herramienta que sustituya el filtro de radio telemetría por perfiles por una de línea de vista llamada ViewShed. Además se observó que el mapa final presenta zonas de sombra (falta de cobertura) por la falta de infraestructuras de radio telemetría, principalmente al nordeste del Estado de Chiapas. Estas zonas pueden ser áreas de importante actividad sísmica que pueden quedar sin ser instrumentadas. Así siendo, se incorporará al modelo un nuevo filtro de puntos de acceso a Internet o de datos móviles públicos y/o privados; requiriéndose nuevas capas de información que pueden ser fácilmente creadas con datos oficiales sobre acceso a Internet en instituciones gubernamentales o escolares.

Como ejemplo de esta solución, al nordeste del estado, existe una zona de sombra, y como se refirió en el capítulo 4, los mapas de ambiente geotectónico y de densidad de sismos revelan que ésta región presenta una elevada actividad sísmica, y más, la presencia de la falla Polochic-Motagua. Se puede superar este obstáculo con la implementación de una estación sísmica en los terrenos de instalaciones públicas y/o educativas que poseen acceso a Internet satelital como la Universidad Tecnológica de la Selva.

A mediano plazo, un año máximo, se debe dar continuación de los estudios de sitio con las debidas visitas de validación a cada local, para determinar las características de niveles de ruido, acoplamiento sísmico, telemetría y en particular la autorización de los propietarios quiera para los estudios in situ quiera para lo probable instalación; y de seguida la sumisión de un proyecto de investigación e infraestructura para la implementación de la red y un centro de

recepción de datos más un centro de investigación; con la participación de socios regionales, nacionales e internacionales.

A largo plazo se pretende extender la red quiera en número de estaciones, áreas de vigilancia (volcanes) y otras técnicas (GPS, gases, etc.) quiera a la generación de recursos humanos locales en las diversas áreas técnicas y de investigación. Esta fase del proyecto requiere la capacidad financiera que solo un presupuesto anual puede solventar.

## 6. Bibliografía

BARREDO CANO, JOSÉ I. (1996) - Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio, en la ordenación del territorio, RA-MA Editorial, España, julio, 1996, 250 pp. ISBN 84-7897-230-7

FERNÁNDEZ BUSTILLO, A. (2014) – Diseño de una herramienta de evaluación multicriterio. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, Facultad de Informática, Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos e Ingeniería del Software, trabajo de fin de carrera. Recuperado el 24 de marzo de 2014, de: [http://oa.upm.es/7304/1/PFC\\_ANA\\_FERNADEZ\\_BUSTILLO.pdf](http://oa.upm.es/7304/1/PFC_ANA_FERNADEZ_BUSTILLO.pdf)

HAVSKOV, J., ALGUACIL, G. (2002) – “*Instrumentation in Earthquake Seismology*”. *Modern Approaches in Geophysics*, Springer, ISBN 978-1-4020-2969-1, Páginas 1-10.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C., & BAPTISTA LUCIO, P. (2014) - Metodología de la investigación: Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio (6a. ed. --.). México D.F.: McGraw-Hill.

MALCZEWSKI JACEK (1999) – “Chapter 3 Introduction to Multicriteria Decision Analysis” paginas 81 – 100, en “GIS and multicriteria decision analysis”. John Wiley y Sons, Inc. Canada, ISBN 0-471-32944-4.

PETERSON, J. (1993) - Observations and Modeling of Seismic Background Noise. U.S.G.S, Open File Report, 93-322, 95 p

SAATY, T. (1980) - “The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation”. McGraw-Hill, New York.

SISTEMA ESTATAL DE PROTECCIÓN CIVIL (2017) – “Informe EDAN Sismo 7/09/2017”, Secretaria de Protección civil del estado de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

TRNKOCZY, A., BORMANN, P., HANKA, A., HOLCOMB, L., NIGBOR, R. (2012) – Chapter 7 “*Seismic Sensors and their Calibration*”. Páginas 1-16, en Bormann, P. (Ed.) (2012) – “*New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*”, Potsdam : Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI.

## **Sitios Web Consultados**

2017 – [www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx](http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx)

2018 – <http://ssn.unam.mx>

2018 - [www.ceieg.chiapas.gob.mx](http://www.ceieg.chiapas.gob.mx)

2017 - <http://www.inegi.pt/>

2019 - <https://smn.conagua.gob.mx>

2018 - [www.wovo.org](http://www.wovo.org)