

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA  
PARA LA LOCALIZACIÓN DE SIRENAS DE EMERGENCIA Y  
PREVENCIÓN DE SISMOS.**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**AUTOR**

Yessenia Morales Villafuerte

**ASESOR:**

Norman Estuardo Reyes Morales

Lima, agosto, 2020

## RESUMEN

La ocurrencia de sismos en distintos países a lo largo de los años ha generado grandes impactos en la población, provocando ha originado la necesidad de desarrollar un sistema de alerta temprana que permita prevenir a la población sobre la llegada de un movimiento sísmico. La presente investigación presenta un análisis de las características y tipos de sismos, a fin de señalar los peligros y riesgos sísmicos que deberán ser mitigados por un sistema de alerta sísmica, una de las herramientas con mayor eficacia y de mayor implementación en países a fin de reducir los daños ocasionados por los sismos. Para la evaluación de su efectividad, se analizan los antecedentes y resultados obtenidos de los sistemas de alerta implementados en México y Japón, y presentando los medios utilizados para la emisión de las alertas y su cobertura en las regiones. Así también, a fin de garantizar que la alerta pueda ser percibida por la población ubicada en zonas de riesgo sísmico, se presentan las herramientas de investigación utilizadas en proyectos de localización de sirenas de emergencia a fin de garantizar la mayor cobertura de la región y por ende de la población, dando como resultado el cumplimiento en el tiempo de evacuación propuesto por los sistemas de alerta sísmica y consiguiendo que la población realice las acciones rápidas de prevención con mayor rapidez para reducir el impacto de los sismos.

## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia, por su constante apoyo y buen ánimo, quienes siempre me han acompañado a lograr con mis sueños y que, ante todo, siempre me han motivado a ser mejor persona.*

*A mi mentor Jonatán Rojas quien me apoyó en alcanzar varios de mis sueños y quien me ha motivado a trazar nuevos retos, agradezco su apoyo en esta investigación y en mi desarrollo académico y profesional.*



## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Sismología.....	1
1.2. Sismos .....	5
1.2.3. Riesgo sísmico .....	7
1.2.1. Intensidad.....	9
1.2.2. Magnitud.....	11
1.3. El sistema de alerta temprana de sismos .....	11
1.3.1. Antecedentes.....	12
1.3.2. Funcionamiento .....	14
1.3.3. Efectividad.....	17
1.4. Modelos Matemáticos .....	19
1.4.1. Investigación de Operaciones .....	19
1.4.2. Modelos matemáticos de Localización.....	22
1.4.3. Location Set Covering Problem .....	22
1.4.4. Maximal Coverage Location Problem.....	26
1.4.5. Minimun Impedance Model (P-median) .....	28
<b>CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE CASOS.....</b>	<b>31</b>
2.1. Aplicación del Sistema de Alerta Temprana.....	31
2.1.1. Sistema de Alerta Temprana de Japón .....	31
2.1.2. Sistema de Alerta Temprana de México.....	35

2.2. Modelos matemáticos de localización.....	37
2.2.1. Modelo multi-criterio para la localización de refugios en caso de sismos .....	37
2.2.2. Modelo de localización de sirenas de emergencia.....	41
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los grados de intensidad Mercalli Modificada (MM). .....	10
Tabla 2. Escala de intensidades sísmicas Mercalli Modificada y MSK. ....	11
Tabla 3. Comparación de los modelos de localización presentados. ....	30
Tabla 4. Resumen de los resultados de los nueve escenarios analizados .....	46



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de límites de placas tectónicas.....	3
Figura 2. Tipos de fallas geológicas .....	4
Figura 3. Principales placas tectónicas de la Tierra .....	4
Figura 4. Clasificación de ondas sísmicas .....	6
Figura 5. Plano de falla, hipocentro y epicentro de un sismo .....	7
Figura 6. Concepto del sistema de alerta temprana por J. D. Cooper de 1868. ....	13
Figura 7. Identificación de ondas sísmicas P y S en el suelo.....	15
Figura 8. Sistema de alerta temprana regional (a) y sistema de alerta temprana in si-tu (b)...	16
Figura 9. Encuesta “¿Cuántos segundos previos puede notificar el EEWW?” realizada por Global Time China.....	18
Figura 10. Presentación de información sobre escalas sísmicas de JMA.....	33
Figura 11. Sistema de comunicación para alertas sísmicas .....	34
Figura 12. Etapas del Sistema de Alerta Temprana de México (SISMEX).....	36
Figura 13. Resultados del modelo de localización de refugios de evacuación de Yangzhou..	41
Figura 14. Mapa de localización inicial de las sirenas de una ciudad en EE.UU.....	45
Figura 15. Localización inicial de sirenas en escenario 3A (A) y localización del escenario 3A al retirar la sirena de ubicación en punto 3 (B).....	47
Figura 16. Localización final del escenario 3A al retirar la sirena ubicada en la posición 3. .	48

# **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo, se detallan las principales definiciones que abordan la ocurrencia de un desastre natural como los sismos; así mismo, se presenta la definición de un sistema de alerta temprana y funcionamiento; finalmente, se describen las principales herramientas de optimización matemática.

## **1.1. Sismología**

La sismología es la ciencia que estudia los sismos y su propagación en la superficie; sin embargo, no fue considerada como ciencia hasta mediados del siglo XX debido a las distintas interrogantes que se tenían sobre el origen y ocurrencia de los sismos en esas épocas. En 1912, el meteorólogo alemán Alfredo Wegener propuso la teoría de la Deriva de los Continentes en la cual sostiene que hace aproximadamente 200 millones de años, los continentes que actualmente se observan formaron en ese momento una sola superficie que denominó Pangea y que, en el transcurso del tiempo, esta masa estuvo en constante movimiento que conllevó a su separación, formándose los continentes actuales de la tierra (Kuroiwa, 2014).

Wegener además describe que los fondos oceánicos actuales presentan una naturaleza distinta a la superficie de los continentes, por lo que no se puede considerar que la superficie de los continentes fuese la misma que los fondos de los océanos, sino que esta nueva superficie se generó a partir de la separación de la pangea inicial. Esta descripción sobre los fondos oceánicos pudo ser corroborada en la década de 1960 cuando la armada norteamericana realizó un levantamiento de los fondos marinos; en esta evaluación se pudo observar que los bordes costeros de los distintos continentes se ajustaban a los de otros continentes considerando la diferencia de hundimiento causada por el nivel del mar (Ortega, C., 2014).



No obstante, si bien la teoría de Wegener no fue aceptada en tal época por las incertidumbre y objeciones hacia la teoría del movimiento de las placas a través de los océanos. De acuerdo a las recopilaciones de Isacks, Oliver y Sykes (1986), la teoría de Wegener en conjunto con el hallazgo de los fondos oceánicos dieron origen a la postulación de la teoría Tectónica de las Placas o Tectónica Global. Esta teoría postula que la Tierra cuenta con una capa superficial de suelo denominada Litósfera que presenta una profundidad de 100km, que a su vez se encuentra dividida en distintas placas tectónicas que conforman los continentes, detallando así que estas placas se desplazan en distintas direcciones por la superficie de la Tierra a partir de las corrientes de convección generadas desde el manto de la tierra.

De esta forma, los bordes de las placas tectónicas o también llamados límites de placa se encuentran en constante deslizamiento, superponiéndose una sobre otra o chocando entre sí. La unión de los bordes de placa se denominan fallas geológicas que se generan a partir de la energía acumulada en el atascamiento de las placas debido a la aspereza que presentan los bordes. Así, mientras mayor sea el tiempo en que las placas tectónicas permanezcan juntas, mayor será la energía acumulada en las fallas con lo cual al generarse un movimiento de las placas, esta energía acumulada es liberada abruptamente generando las ondas sísmicas en la superficie (Sitharam, T. G., Kolathayar, S., 2018). Los bordes o límites de placa pueden ser clasificados de tres formas debido al movimiento de las placas tectónicas.

- (A) **Placas divergentes:** Las placas se separan al moverse en direcciones contrarias a la unión de los bordes de placa. Esta característica se presenta principalmente en las cordilleras oceánicas.
- (B) **Placas convergentes:** Las placas chocan entre sí al presentar movimientos en direcciones a la unión de los bordes, provocando que la placa de mayor densidad se introduzca bajo la otra.

(C) **Placas con movimiento lateral:** También denominadas placas transformantes o transcurrentes, presentan movimientos en direcciones paralelas a la unión de los bordes generando un desplazamiento lateral, una junto a la otra.

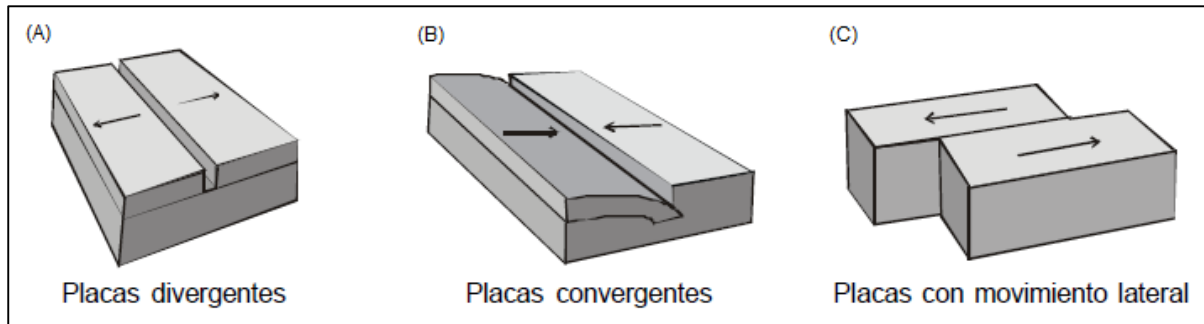


Figura 1. Tipos de límites de placas tectónicas

Tomado de “Ciencias de la Tierra”, por Tartabuck, Lutgens, Tasa, 1999.

A partir de la clasificación de los límites de placa, se presentan las características de las fallas geológicas que, de acuerdo a Tartabuck, Lutgens y Tasa (1999) en el libro “Ciencias de la Tierra”, se pueden clasificar en tres tipos de fallas dependiendo del movimiento de las placas y la dirección de tal movimiento originado por la liberación de la energía acumulada en las fallas.

- (A) **Falla inversa:** Generada por la compresión horizontal que realizan ambas placas y que provoca la elevación de una placa respecto a la otra.
- (B) **Falla normal:** Generada por las fuerzas de distensión o extensión de las placas en la cual la anterior placa superior comienza a deslizarse hacia abajo.
- (C) **Falla de rumbo:** Generada por el movimiento relativo horizontal de las placas y que se presenta en un plano vertical donde los bordes de placa no estaban superpuestos.

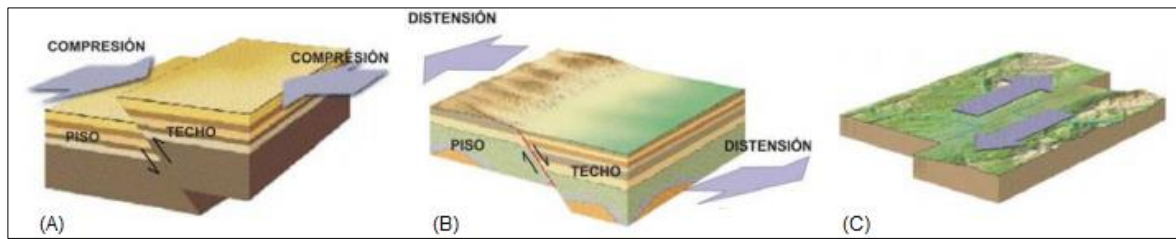


Figura 2. Tipos de fallas geológicas

Tomado de "Ciencias de la Tierra", por Tarbuck, E., Lutgens, F. y Tasa, D., 1999.

De esta forma, la identificación de las placas tectónicas, los límites de placa y las fallas geológicas ha permitido evidenciar las zonas de mayor concentración de actividades sísmicas en la superficie terrestre, a fin de realizar el estudio de estas fallas para el entendimiento y estudio respectivo de la ocurrencia de los sismos. En la Figura 3 se presentan las principales placas tectónicas de la Tierra y las fallas geológicas que se forman con la unión de los bordes de placas, donde se puede observar que la limitación de las placas no se define por las superficies de los continentes, sino que estos límites se presentan también en parte de los océanos donde se presenta baja profundidad (Sauter, F., 1989).

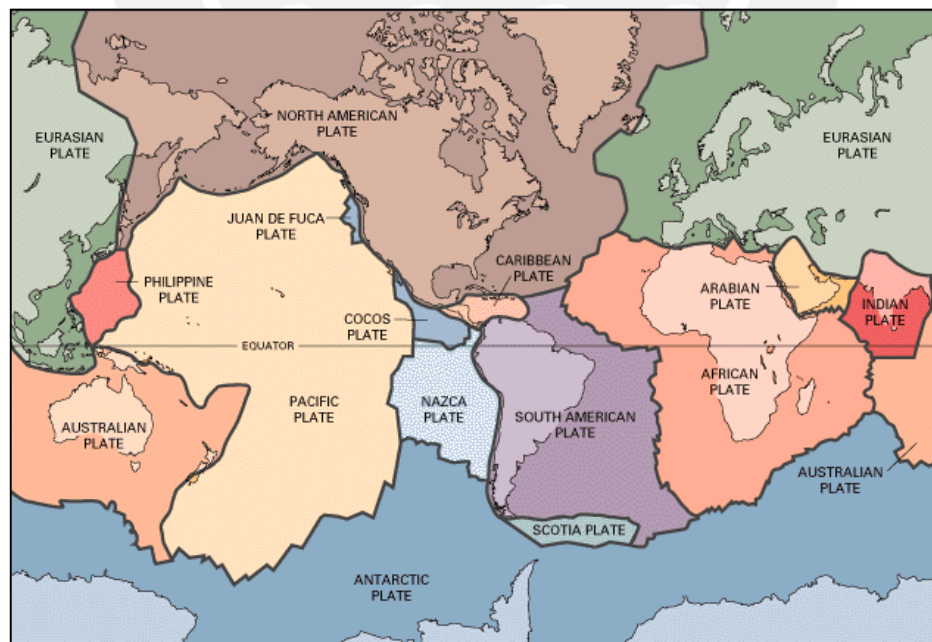


Figura 3. Principales placas tectónicas de la Tierra

Tomado de Earthquakes, por United States Geological Survey (USGS), 2014.

## 1.2. Sismos

Los sismos representan los movimientos o vibraciones del suelo que son originados por la energía liberada de los mantos superiores de la Tierra hacia la corteza terrestre, siendo este un evento repentino que se propaga en distintas direcciones sobre una región específica.

El movimiento sísmico se propaga mediante ondas sísmicas, las cuales viajan por el interior de la tierra (ondas P y S) o por la superficie del suelo (Love y Rayleigh) provocando las deformaciones en la corteza terrestre (Sagripanti, Bettioli, Seitz, 2007).

- **Ondas longitudinales, primarias o P:** Se propagan a velocidad de 8 y 13 km/s y en sentido de la vibración de partículas; circulan por el interior de la Tierra y son las primeras ondas que registran los instrumentos de medición.
- **Ondas transversales, secundarias o S:** Se propagan a menor velocidad que las ondas P, presentan una velocidad entre 4 y 8 km/s, y viajan en sentido perpendicular a la vibración de partículas; atraviesan solo sólidos y son las segundas en ser registradas por los instrumentos de medida.
- **Ondas superficiales (Love, Rayleigh):** Se propagan a menor velocidad (3.5 km/s); se generan a partir de la interacción de las ondas P y S cuando estas alcanzan la superficie; ondas similares a las que se generan en la superficie del mar y son las últimas en ser registradas por los instrumentos.

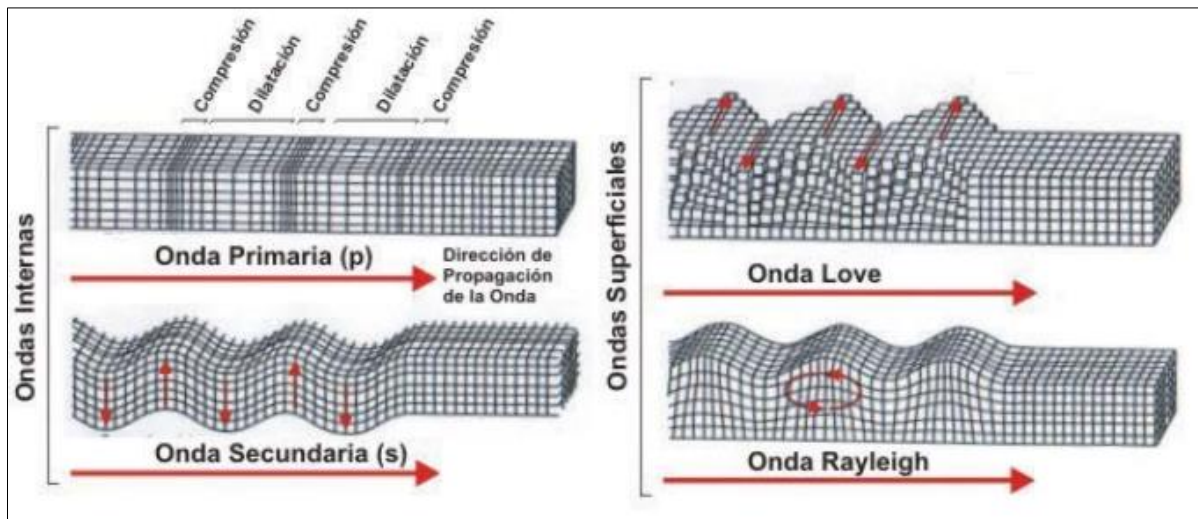
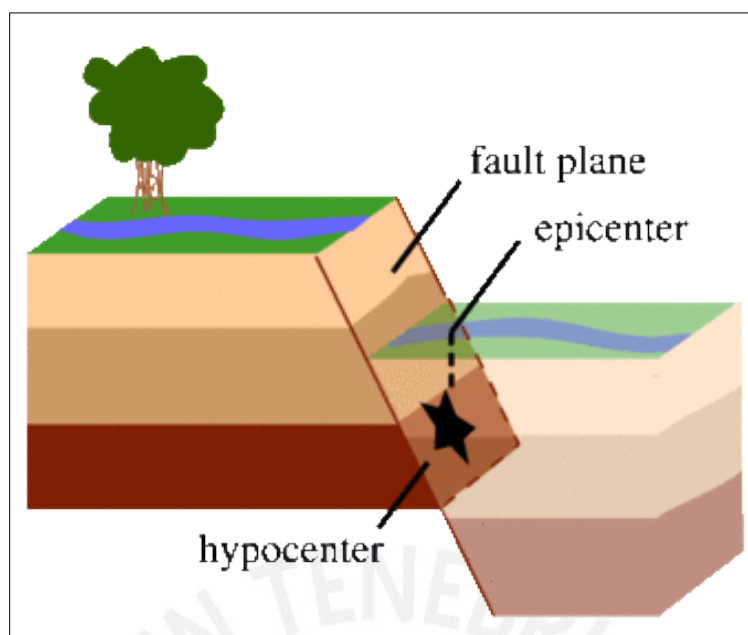


Figura 4. Clasificación de ondas sísmicas

Tomado de "Seismological Information Necessary for Beneficial Earthquake Risk Reduction", por Bolt, B.A., 1994.

Las ondas sísmicas comienzan a propagarse a partir del punto de origen del sismo, el cual normalmente se encuentra en el interior de la corteza terrestre. Este punto genera las vibraciones, tanto longitudinales como transversales, que comienzan a propagarse en el interior de la Tierra y que, de acuerdo a la distancia de propagación, estas vibraciones serán más débiles según se encuentren a mayor distancia de punto inicial (Ortega, C., 2014).

- **Hipocentro o foco:** Punto al interior de la corteza terrestre donde se libera la energía que ocasiona el movimiento sísmico. Normalmente el hipocentro se ubica entre 15 y 45 km de la superficie; no obstante, dependiendo de la profundidad del tipo de sismo, este puede terminar localizándose a más de 600 km.
- **Epicentro:** Representa el área o la superficie directamente vertical sobre el hipocentro, siendo esta superficie donde se presenta la mayor intensidad del sismo.
- **Plano de falla:** Superficie de expansión del sismo donde los efectos del sismo pueden ser percibidos.



*Figura 5. Plano de falla, hipocentro y epicentro de un sismo*

*Tomado de Earthquakes, por United States Geological Survey (USGS), 2014.*

Adicionalmente, los sismos pueden ser clasificados de acuerdo a la profundidad en que se libera la energía del hipocentro. Se presentan tres distinciones en base a la profundidad: (1) sismos superficiales que ocurren a menos de 60 km, (2) sismos intermedios con profundidad entre 60 y 300 km, y (3) sismos profundos, mayores a 300 km.

Por último, la medición de la fuerza, energía y ubicación del sismo se realiza mediante la utilización de un sismógrafo, instrumento diseñado para registrar las vibraciones que ocurren en el suelo con el objetivo de que los sensores detecten el movimiento lo más cercano al hipocentro.

### **1.2.3. Riesgo sísmico**

El riesgo sísmico representa la evaluación cuantitativa de las consecuencias perjudiciales debido a la ocurrencia de un sismo, que conlleva a resultados como pérdida de vidas, daño a bienes materiales e impacto en la zona determinada. Este concepto es definido como la

probabilidad de que una localidad se ve afectada por la ocurrencia de un sismo, la cual se encuentra asociada con el peligro sísmico y vulnerabilidad sísmica que se presente en la zona (Mac-Guirre, R.K., 2004).

De esta forma, el riesgo sísmico ( $R$ ) se determina a partir de la peligrosidad sísmica ( $P$ ) y la vulnerabilidad sísmica ( $V$ ) que presente una región en determinado espacio y periodo.

$$R = P \times V$$

Tanto la peligrosidad como la vulnerabilidad sísmica están relacionados a la probabilidad de ocurrencia de un sismo, por lo que el riesgo se ve potencialmente afectado por esos dos factores.

**(A) Peligrosidad sísmica - P**

Este concepto permite evaluar la probabilidad de ocurrencia de un sismo con impacto mayor al determinado, con lo cual se desarrollan los mapas de peligro sísmico que permiten evidenciar los efectos que afectan a las personas y edificaciones de una zona específica y en un periodo esperado.

**(B) Vulnerabilidad sísmica - V**

La vulnerabilidad permite evidenciar la capacidad de respuesta de la población ante la ocurrencia de un sismo. Esta cuantificación se relaciona con las condiciones sociales que se presenta en una zona determinada en cuanto a factores económicos, culturales y políticos, donde la vulnerabilidad impacta directamente en los efectos provocados por el sismo al mostrar los aspectos no desarrollados en la sociedad que influyen en que las personas se encuentren más susceptibles a sufrir daños (Blaikie, Cannon, Wisner, Davis, 1996).

### **1.2.1. Intensidad**

La intensidad es uno de los primeros conceptos que aparecieron antes del desarrollo de los instrumentos de medición sísmica, lo cual permitió contar con una medición de la fuerza destructiva del sismo en una zona determinada; debido a esta situación, también se le alega subjetividad a esta medición debido a que la valoración se encuentra relacionada a la observación de la situación en la zona y a información brindada por las personas afectadas.

La aplicación de clasificaciones que distinguiesen los efectos provocados por los sismos se realiza a partir de finales del siglo XIX, donde se hace referencia a los estudios realizados por el ingeniero Robert Mallet en 1862 en los que detalló los impactos producidos por un terremoto de 1857 que afectó la ciudad de Nápoles, Italia (Ortega, C., 2014).

Para medir el grado de intensidad de un sismo, se presentan las escalas de Mercalli Modificada (MM) que se utiliza en América y que fue propuesta por H. Wood y F. Newman, y la escala MSK para Europa propuesta por S. V. Medvedev, W. Sonheuer y V. Karnik (Muñoz, 1989). Estas dos escalas constan de doce grados (del I al XII) que resultan prácticamente equivalentes entre sí.

#### **(A) Intensidad de Mercalli Modificada (MM)**

La escala MM fue propuesta por H. Wood y F. Newman en 1931 y posteriormente por C. F. Richter en 1956, que se basan de la escala propuesta por G. Mercalli en 1902. Esta escala es la que se utiliza en los países de América y que es representada con números romanos. A continuación, se presenta una descripción de los doce grados que componen esta escala.



Tabla 1. Descripción de los grados de intensidad Mercalli Modificada (MM).

Grado	Descripción
Grado I	Detectado solo por instrumentos de medición sísmica.
Grado II	Percibido por personas en reposo.
Grado III	Percibido en casas y edificios. Vehículos en reposo pueden comenzar a balancearse.
Grado IV	Sentido dentro y fuera de casa y edificios, principalmente en edificios altos. Vibración de ventanas y puertas. Vehículos estacionados se balancean.
Grado V	Sentido por casi todos. Objetos caen, balanceo de árboles, postes y edificios altos.
Grado VI	Sentido por todos. Daños estructurales leves: rajaduras en muros.
Grado VII	Daño ligero en estructuras diseñadas especialmente, daño moderado en construcciones normales y considerable en malas edificaciones.
Grado VIII	Daño ligero en estructuras diseñadas especialmente, daño considerable en construcciones normales y grande en malas edificaciones.
Grado IX	Daño considerable en estructuras diseñadas especialmente, daño grande en construcciones normales y malas.
Grado X	Destrucción severa en edificios bien contruidos. Suelo agrietado.
Grado XI	Pocas edificaciones permanecen de pie, anchas grietas en el suelo, hundimiento de la tierra.
Grado XII	Destrucción total, catástrofe.

*Nota. Tomado de "Terremotos: nuestro planeta vibra bajo el poder de su energía", por Sagripanti, G., Bettiol, A., Seitz, C., 2007.*

## (B) Intensidad MSK

Escala de intensidad utilizada en países de Europa que se basa en los tipos de edificaciones típicas del continente, y a diferencia de la escala MM, la escala MSK requiere de información sobre el tipo de suelo, tipo y material utilizado en las edificaciones, además del detalle de antigüedad de estas.

De esta forma, Reiter (1990) realizó una comparación de las intensidades sísmicas entre las escalas MM y MSK con el objetivo de evidenciar las equivalencias entre los

grados mediante celdas, obteniendo así que existe una similitud entre los grados IV a XII y lo mismo para el grado I; en cuanto a los grados II y III, se presenta una diferencia considerable pues el grado III de la escala MSK es un tercio mayor que el grado III de la escala MM (Ccallo, F., 2003).

Tabla 2. Escala de intensidades sísmicas Mercalli Modificada y MSK.

<b>MERCALLI MODIFICADA</b>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>MSLK</b>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

*Nota. Tomado de “La magnitud de los sismos locales y regionales ocurridos en Perú.”, por Ccallo, F. (2003), basado en Reiter (1990).*

### 1.2.2. Magnitud

El concepto de magnitud fue propuesto en 1932 por Charles Richter con el objetivo de realizar una medición cuantitativa de la energía liberada para comparar el tamaño del sismo con los otros sismos ocurridos alrededor del mundo, sin considerar los efectos ocasionados por el sismo. La magnitud de Richter considera un valor inicial de magnitud cero como referencia y se determina la magnitud del sismo a partir del movimiento registrado por los sismógrafos.

Adicionalmente, la evaluación que se realiza a un sismo no solo depende de los parámetros asociados a su ocurrencia, sino también a los efectos que este fenómeno ocasiona en la sociedad.

### 1.3. El sistema de alerta temprana de sismos

En la actualidad, aún no se ha implementado una tecnología que permita predecir el lugar, tiempo y magnitud de ocurrencia de un sismo, motivo por el cual se presenta el principal

enfoque en mitigar el impacto de los sismos mediante la prevención para maximizar la respuesta de la población ante el suceso de una actividad sísmica.

El Sistema de Alerta Sísmica Temprana o EEW (Earthquake Early Warning System, según siglas en inglés) presenta como objetivo determinar la magnitud inicial generada por el epicentro del sismo mediante una red de sismógrafos ubicados en puntos estratégicos que permitan registrar estos sismos lo más cercanos posibles a su epicentro. Heaton (1985), en su propuesta de un modelo de sistema de alerta sísmica, detalla que los sismógrafos permiten registrar la magnitud del epicentro y envían esta señal hacia un centro de monitorio, donde se realiza la evaluación y validación de la magnitud e impacto del sismo lo más pronto posible, para así emitir una alerta pronta a la población antes de la llegada del movimiento telúrico. Este proceso de registro, validación y comunicación es realizado en el menor tiempo posible, por lo que el principal aporte de un sistema de alerta sísmica es en brindar una alerta temprana para dar un margen de prevención a la población o detener el funcionamiento de instalaciones que pudiesen generar mayor daño a la llegada del sismo, logrando de esta forma reducir el impacto del sismo en la población.

### **1.3.1. Antecedentes**

La idea de implementar un sistema de alerta temprana que pudiera alertar a la población sobre la ocurrencia de un sismo surgió a finales del siglo XIX. En 1868 luego del terremoto de San Francisco, EE.UU., el Dr. J. D. Cooper (1868) propuso, en el diario San Francisco Bulletin, la idea de desarrollar un sistema de alarmas ante la llegada de un movimiento telúrico con el objetivo de minimizar el impacto del sismo en las localidades. Esta propuesta del Dr. Cooper se basó en colocar cables telegráficos a lo largo de la ciudad de San Francisco que generasen una corriente eléctrica al sentir un movimiento telúrico, yendo esta corriente hasta lo alto de un edificio en el centro de la ciudad donde una campana generaría el sonido para alertar a los

ciudadanos. No obstante, Nakamura y Saita (2007) expresan que debido a la tecnología que se contaba en esa época era limitada, esta propuesta de un sistema de alerta no pudo ser desarrollado, dado que principalmente se presentaba la dificultad de determinar la localización de origen de los sismos.

Luego, de acuerdo a un artículo publicado en un diario iraní en 1909, un operador telegráfico describió un sistema cableado de cobre con agujas magnéticas que había elaborado años previos y que le permitió registrar una señal electromagnética segundos previos al terremoto de Irán el 27 de mayo de 1897 (M. Allen, 2013). Sin embargo, no fue hasta 1950 cuando las líneas ferroviarias de Japón comenzaron a instalar acelerómetros a fin de asegurar el correcto funcionamiento de los rieles, lo cual condujo a un sistema de prevención y alerta de terremotos UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System, según siglas en inglés) que permitió a Japón implementar el primer sistema de alerta temprana en el mundo (Wenzel, 2001).

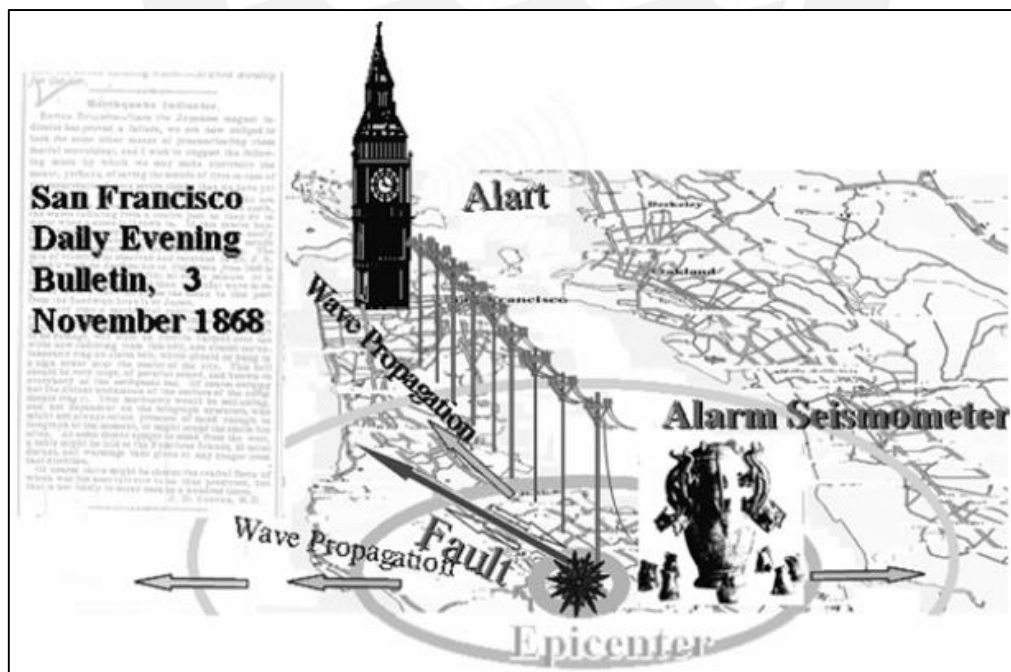


Figura 6. Concepto del sistema de alerta temprana por J. D. Cooper de 1868.

Tomado de “UrEDAS, the Earthquake Warning System: Today and Tomorrow”, por Nakamura y Saita, 2007.

### 1.3.2. Funcionamiento

El principio de funcionamiento de un sistema de alerta sísmica se centra en registrar la energía generada por la propagación de las ondas sísmicas en el suelo, considerando esta energía contenida en dos tipos de ondas que permiten detectar el movimiento: las ondas P u ondas preliminares, y las ondas S u ondas principales. En primer lugar, las ondas P son las primeras en propagarse debido a su mayor velocidad de propagación de alrededor 8 km/s a diferencias de las ondas S que viajan a 4 km/s, de acuerdo a la Agencia Meteorológica de Japón o Japan Meteorological Agency (JMA, según siglas en inglés) (2007). No obstante, Wu y Kanamori (2005), en su investigación del daño de las ondas sísmicas en los eventos ocurridos en Taiwán detallan que, si bien las ondas P presenten menor magnitud e impacto que las ondas S, al registrar las ondas P es posible determinar la magnitud final del sismo en camino puesto que estas ondas P cuentan con información suficiente para su análisis.

Por tanto, al contar con una red de sismógrafos ubicados en zonas cercanas al epicentro del sismo se puede registrar estas ondas P en menor tiempo para determinar la magnitud máxima del movimiento y con ello transmitir la alerta previa a la llegada de las ondas de mayor intensidad (ondas S) que generarán mayor impacto. Zollo, Iannaccone, Convertito, Elia, Iervolino, Lancieri, ...Gasparini (2009) precisan que esta transmisión de la alerta es posible de realizar debido a que las señales electromagnéticas que envían los sismógrafos viajan a mayor velocidad de la propagación de las ondas S, consiguiendo así el tiempo necesario para la notificación a la población.

En la Figura 7 se presenta la detección inicial de las ondas P, en la cual un sismógrafo ubicado cerca al epicentro del sismo registra la onda preliminar (onda P) y transmite esta observación al centro de control de la Agencia Meteorológica de Japón o JMA, según se

muestra en la figura, y se logra emitir la alerta previo a la llegada de la onda principal (onda S) a la ubicación del sismógrafo.

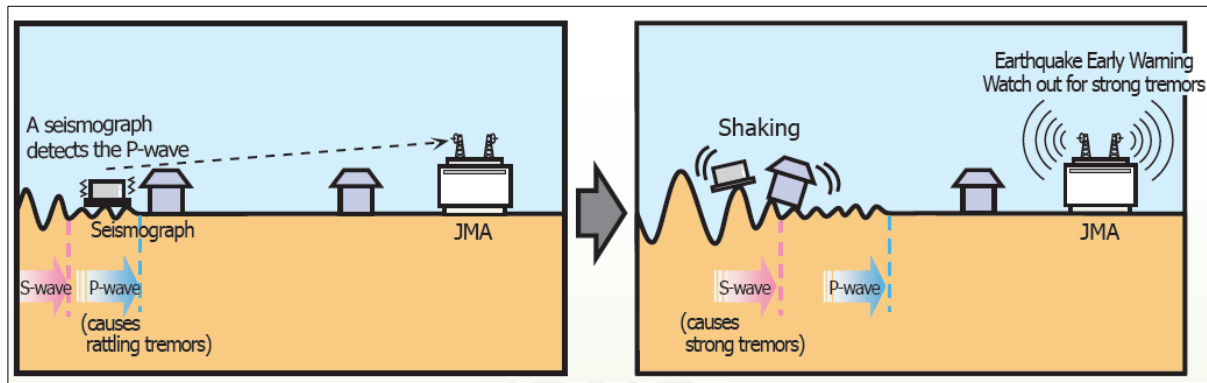


Figura 7. Identificación de ondas sísmicas P y S en el suelo.

Tomado de Listado de tablas de explicación de intensidades sísmicas, por Japan Meteorological Agency.

Por otro lado, teniendo en cuenta que se requiere registrar las ondas P para estimar el epicentro y magnitud del sismo, también se considera necesario determinar adecuadamente la ubicación de la red sismográfica que detectará prontamente las ondas P, pues mientras mayor sea la separación entre la llegada de las ondas P y las ondas principales, mayor será el tiempo de respuesta que se brindará ante la inminente llegada de un sismo, con el fin de reducir su impacto en la población. Ante esto, un sistema de alerta temprana presenta dos configuraciones que condicionan la distribución en la localización de los sismógrafos, de tal forma que se puede tener un sistema regional o un sistema in-situ.

#### (A) Sistema Regional

Consiste en la ubicación de una red de sismógrafos que rodean una potencial zona de epicentro de sismos para detectar la energía liberada lo más pronto posible, mientras que las zonas a alertas (localidades) se encuentran lejanas a esta zona de epicentro. Kanamori (2005) precisa que los parámetros de ubicación y magnitud del sismo se registran a partir de la detección de la onda P; a partir de ello, esta información es enviada

hacia un centro de control donde se realizará la estimación de la magnitud e intensidad final del sismo y se emitirá la alerta en la localidad si la magnitud del sismo supera un umbral prefijado.

**(B) Sistema *in-situ***

Consiste en desplegar una serie de sismógrafos en los alrededores de la zona a alertar para lo cual se utilizan los primeros segundos del movimiento para pronosticar la máxima magnitud del sismo en el mismo sitio y antes de la llegada de las ondas S. Iervolino (2011) en su estudio del rendimiento de los sistemas de alerta sísmica, señala que a diferencia del sistema regional, el sistema *in-situ* cuenta con una red de sismógrafos más pequeña por lo cual la distancia de los sismógrafos hacia las instalaciones depende del tiempo necesario para activar la alarma; esto a su vez también limita a que solo registren la magnitud del evento sísmico y no otras características debido al corto tiempo de estimación con el que se cuenta.

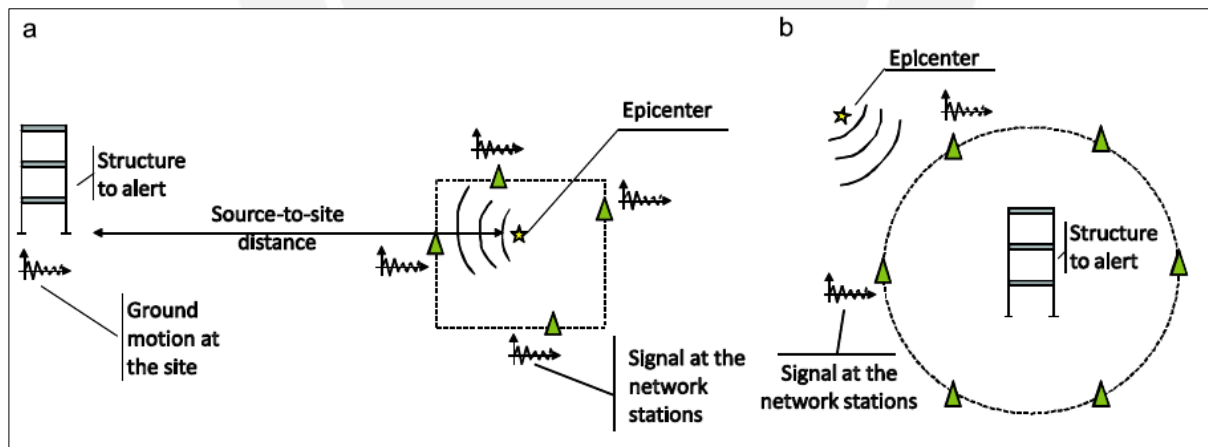


Figura 8. Sistema de alerta temprana regional (a) y sistema de alerta temprana in-situ (b).

Tomado de "Performance-based earthquake early warning", por Iervolino, 2011.

La implementación de un sistema de alerta temprana debe ser realizado de forma independiente, mientras que el gobierno y entidades públicas deberán garantizar y asegurar la

correcta recolección de información para el desarrollo y funcionamiento del sistema de alerta sísmica. De esta forma, Nakamura y Saita (2007) detallan que la cooperación entre entidades para el desarrollo de un sistema de alerta temprana, permitirá su adecuada implementación bajo las siguientes actividades:

- Rápida detección del sismo al contar con una red de sismógrafos cerca de la zona del epicentro del sismo y lejos de las áreas urbanas con el objetivo de presentar un mayor tiempo de prevención entre la detección del sismo y la emisión de alerta.
- Manejo automático de la detección de la magnitud de la alerta a fin de garantizar la inmediata comunicación de la alerta a las localidades.
- Educación sobre prevención de desastres para la población a fin de que tengan presente el significado de las alertas y sobre las acciones a tomar en estas situaciones.
- Evitar las informaciones erróneas y falsas alertas que son parte de la implementación del sistema de alerta temprana; resulta necesario asegurar constantemente que el sistema no emita falsas alarmas.

### **1.3.3. Efectividad**

El tiempo de advertencia que se brinda depende de la velocidad en que el sistema de alerta sísmica o EEW emite la señal y la distancia entre el epicentro del sismo y la localidad que deberá recibir la alerta. Este tiempo puede variar desde segundos hasta un minuto de diferencia entre los distintos sistemas de alerta que se desarrollen debido principalmente a la ubicación del epicentro del sismo. La figura 9 presenta una encuesta realizada por el diario Global Times China (2017), donde se muestra el detalle de los tiempos de advertencia previos a la llega de sismos ocurridos en los últimos años.



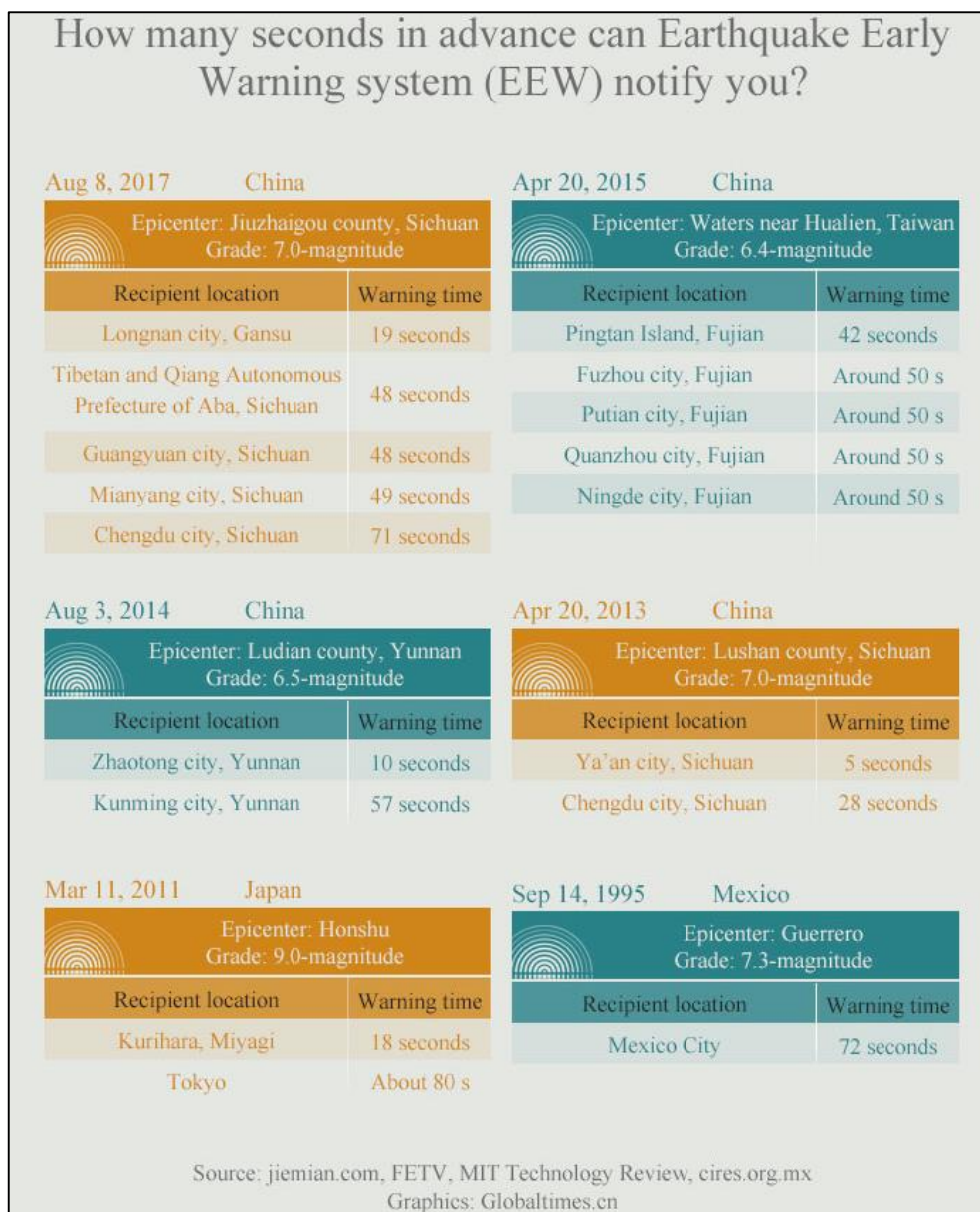


Figura 9. Encuesta “¿Cuántos segundos previos puede notificar el EEW?” realizada por Global Time China.

Tomado de encuesta “How many seconds can Earthquake Early Warning system save for you?”, por Global Times China, basado de MIT Technology Review, 2017.

En base a lo presentado en la figura 9, se puede observar que el sistema de alerta sísmica o EEW ha permitido brindar segundos de advertencia previos a la llegada de la onda sísmica a las localidades respectivas, con lo cual se demuestra la efectividad del sistema en cuanto a dar alerta previa a la ocurrencia del sismo.

## **1.4. Modelos Matemáticos**

El planteamiento de un modelo matemático partirá desde la definición de la investigación de operaciones, presentando las características necesarias para la formulación de un modelo. Además, se presentarán distintos modelos matemáticos de localización y cobertura que serán evaluados de acuerdo a su eficiencia en cuanto a modelos de localización y modelos de cobertura.

### **1.4.1. Investigación de Operaciones**

A partir del siglo XIX distintos estadísticos practicaron este concepto al llevar a cabo la recopilación de datos y estadísticas sobre los ciudadanos, lo cual permitió que se realizaran análisis con el objetivo de identificar patrones o tendencias que faciliten la planificación por parte de los gobiernos europeos.

No obstante, la aparición del concepto de investigación de la investigación de operaciones se presenta durante los años de la Segunda Guerra Mundial, cuyo objetivo buscaba mejorar las tácticas militares y manejar eficientemente los recursos mediante la optimización para el mantenimiento de agua, agricultura y transporte de armamento; del mismo modo, las aplicaciones prosiguieron a estos sucesos, debido a la necesidad de reestructurar la sociedad de la forma más óptima luego de tales eventos (Pollock, Maltz, 1994).

En la actualidad, se presentan distintos tipos de problemas que parten de la investigación de operaciones; sin embargo, los procesos a realizar para abordar estos problemas aún se mantienen de la misma forma en que han estado siendo desarrollados en el pasado. Taha (2012) en su libro de Investigación de Operaciones, detalla las fases principales que deben de realizarse para la implementación de la investigación de operaciones en la solución y optimización de un problema.

**(1) Definición del problema**

Delimitar el alcance del problema a abordar al determinar los tres aspectos principales:

- Describir las variables de decisión.
- Determinar el objetivo del estudio.
- Detallar las restricciones que condicionarán el modelo.

**(2) Construcción del modelo**

Transcribir el problema en base a variables matemáticas, revisando el tipo de problema matemático al cual se relaciona, y verificar si la formulación se asemeja a un tipo de problema o si es necesario realizar una heurística o simulación del caso.

**(3) Solución del modelo**

Aplicar los algoritmos de optimización definidos; así como realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros obtenidos para analizar la solución óptima en base a tales parámetros.

**(4) Validación del modelo**

Verificar si el modelo desarrollado satisface la problemática inicial en base a la solución obtenida; se puede realizar tal validación mediante datos históricos que muestren la diferencia entre los valores o, en caso no se cuente con valores históricos, optar por utilizar la simulación del modelo para evidenciar el resultado matemático.

**(5) Implementación de la solución**

Transmitir los resultados obtenidos mediante la transformación de la situación inicial en base a las variables resultantes del modelo.

Los modelos matemáticos presentan una gran variación respecto a los alcances que estos pueden abarcar y al tipo de problema que se presenta. Entre estas técnicas, resalta la programación lineal como una de las más aplicadas en el entorno industrial.

La programación lineal presenta una función objetivo y un conjunto de variables y restricciones que buscan un resultado óptimo, pero que se caracterizan por ser lineales al encontrarse en la primera potencia.

De tal forma, un modelo matemático de programación lineal se presenta a partir de las restricciones que condicionan la situación del problema y la función objetivo que determina la cantidad de soluciones factibles que genere el problema.

**Maximizar o minimizar la función objetivo:**

$$Z = \sum_i^n c_i \cdot x_n \quad (1)$$

**Sujeto a las restricciones lineales:**

$$\sum_i^n a_i \cdot x_i \leq b_i \quad (2)$$

De esta forma, la ecuación 1 representa a la función objetivo que permitirá obtener el resultado del problema planteado, mientras que la restricción 2 representa a una restricción que delimita los resultados a ser evaluados para obtener el resultado de la función objetivo.

En la modelación algebraica de las restricciones,  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  son valores constantes para cada índice  $i$ , mientras que  $x_i$  representa a una variable de decisión que será utilizada para obtener la solución esperada de la función objetivo.

### 1.4.2. Modelos matemáticos de Localización

Los problemas de localización óptima presentan como objetivo determinar la ubicación adecuada de instalaciones que brinden atención a la mayor área posible y utilizando la menor cantidad de recursos. Las instalaciones que usualmente se requieren localizar son aquellas que brindan un servicio por lo cual requieren cubrir completamente la región esperada, debido a que esto garantiza que se está brindando la atención a toda la población.

Teniendo en cuenta la accesibilidad a distintos modelos matemáticos de localización, se ha optado por presentar los siguientes tres modelos.

### 1.4.3. Location Set Covering Problem

El Location Set Covering Problem (LSCP) presenta como finalidad identificar la menor cantidad de instalaciones que se requieren para asegurar la cobertura de una determinada zona. Toregas, Swain, ReVelle y Lawrence (1971) fueron los primeros en proponer la formulación y aplicación del LSCP, enfocándose en la localización de estaciones de servicios de emergencia. Toregas et al. (1971) denominaron a las demandas a cubrir como “nodos” para contar con una cantidad discreta de potenciales demandas que deberán encontrarse dentro del rango de cobertura ya sea en cuanto al tiempo de respuesta o a la distancia desde la locación hacia el nodo de demanda.

El modelo matemático del LSCP se presenta de acuerdo a la siguiente notación.

$i$  = índice de los nodos demanda a ser cubiertos (set  $I$ )

$j$  = índice de las potenciales ubicaciones de las facilidades (set  $J$ )

$\varphi$  = región a ser cubierta

$a_{ij}$  = 1 si la sirena ubicada en  $j$  puede cubrir a la demanda  $i$ , caso contrario, 0

$$\Omega_i = \{j \in J | a_{ij} = 1\}$$

De la misma forma, el tiempo de respuesta o la distancia,  $s$ , permite definir  $a_{ij}$  y  $\Omega_i$  debido a que si la distancia entre el nodo demanda  $i$  y la sirena  $j$  es menor a  $s$ , entonces se considerará que la demanda está siendo cubierta. Así mismo, las variables que definen la elección de la ubicación para la sirena son las siguientes.

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{si la sirena se coloca en la ubicación } j \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

De esta forma, la formulación de la función objetivo y restricciones se presenta de la siguiente forma.

**Función objetivo:**

$$\min Z = \sum_{j \in J} X_j \quad (3)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{j \in N} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (5)$$

La función objetivo (3) busca obtener la mínima cantidad de sirenas ubicadas que logren cubrir los nodos demanda. La restricción (4) asegura que cada nodo demanda sea cubierto por una sirena dentro de sus posibles ubicaciones, y la restricción (5) garantiza que la variable  $X$  sea binaria.

Adicionalmente, Murray, Tong y Kamyoun (2010) presentan dos modelos LSCP-Implicito y LSCP-Explícito, los cuales permiten que los nodos de demanda sean cubiertos no solo por una sirena, sino por dos o más de tal forma que cada sirena cubre parte de la demanda.

Por un lado, el **LSCP-Implicito** presenta la siguiente notación.

$i$  = índice de los nodos demanda a ser cubiertos (set  $I$ ).

$j$  = índice de las potenciales ubicaciones de las facilidades (set  $J$ ).

$k$  = índice de niveles de cobertura.

$x_j$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la sirena se colocará en la ubicación  $j$ ; caso contrario, 0.

$Y_{ik}$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la demanda  $i$  es cubierta en el nivel  $k$ ; caso contrario, 0.

$\beta_k$  = mínimo porcentaje de cobertura requerido para el nivel  $k$ .

$\alpha_k$  = cantidad mínima de sirenas requeridas para cubrir completamente la demanda en el nivel  $k$ .

$\Omega_{ik}$  = set de sirenas que cubre la demanda  $i$  en al menos  $\beta_k$ .

De acuerdo a la notación, el modelo matemático del LSCP-Implicito se presenta de la siguiente forma.

**Función objetivo:**

$$\min Z = \sum_{j \in J} x_j \quad (6)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{j \in \Omega_{ik}} X_j \geq \alpha_k \cdot Y_{ik} \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_k Y_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (8)$$

$$Y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k \quad (9)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (10)$$

La función objetivo (6) minimiza la cantidad de sirenas a utilizar. La restricción (7) determina que se requieren  $\alpha_k$  sirenas para cubrir completamente los nodos de demanda en el nivel  $k$ . La restricción (8) garantiza la presencia del nivel  $k$  de cobertura. Las restricciones (9) y (10) representan las restricciones de integralidad.

Por otra parte, el **LSCP-Explícito** considera que la cobertura de la demanda se da por un conjunto determinado de sirenas que combinan una serie de sirenas. La notación que utiliza el LSCP-Explícito se presenta de la siguiente forma.

$l$  = índice de la configuración de las sirenas.

$\psi_{ik}$  = conjunto de  $k$  sirenas que cubren completamente la demanda  $i$ .

$\Delta_{ikl}$  = conjunto de  $k$  sirenas en la configuración  $l$  que cubren completamente la demanda  $i$ .

$Z_{ikl}$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la demanda  $i$  es cubierta por la configuración  $l$  de las sirenas  $k$ ; caso contrario, 0.

De esta forma, la formulación del modelo matemático del LSCP-Explícito se presenta a continuación.



**Función objetivo:**

$$\min Z = \sum_{j \in J} x_j \quad (11)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_k \sum_{l \in \psi_{ik}} Z_{ikl} = 1 \quad \forall i \quad (12)$$

$$x_j \geq Z_{ikl} \quad \forall i, k, l \in \psi_{ik}, j \in \Delta_{ikl} \quad (13)$$

$$Z_{ikl} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k, l \in \psi_{ik} \quad (14)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (15)$$

La función objetivo (11) minimiza la cantidad de sirenas a necesitar. La restricción (12) determina que, para completar la cobertura de la demanda, se debe escoger una configuración para localizar las sirenas. La restricción (13) indica que una configuración solo puede ser escogida cuando se requiere localizar las sirenas. Las restricciones (14) y (15) son las restricciones de integralidad de las variables.

#### 1.4.4. Maximal Coverage Location Problem

A diferencia del LSCP donde se busca minimizar la cantidad de instalaciones que permita cubrir la demanda; el Maximal Covering Location Problem (MCLP) se encuentra ligado a un presupuesto que limita la cantidad de instalaciones disponibles a utilizar (Current, Daskin, Schilling, 2002).

El modelo matemático del MCLP fue propuesto por Church y ReVelle (1974) y destacaron su aplicación para localizar centros de emergencia que aseguraran que la distancia desde la instalación hacia la demanda no superara un umbral máximo de distancia para su

atención. Normalmente, el MCLP es considerado cuando se cuenta con un presupuesto que limita la cantidad de instalaciones con las que se disponen; es decir, en caso la cantidad de instalaciones no fuese suficiente para cubrir completamente la demanda dentro del rango de distancia, se opta por maximizar la cobertura posible con el número de instalaciones disponibles (Owen, Daskin, 1998).

Para la formulación del modelo matemático, se presenta la siguiente notación.

$i$  = índice de los nodos demanda.

$j$  = índice de las instalaciones.

$h_i$  = cantidad de la demanda en el nodo  $i$ .

$S$  = distancia dentro de la cual la demanda deseada será cubierta.

$P$  = presupuesto disponible para localizar las instalaciones

$a_{ij}$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la distancia desde la instalación  $j$  hacia la demanda del nodo  $i$  es menor al rango de distancia  $S$ ; caso contrario, 0.

$x_j$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en la ubicación  $j$ ; caso contrario, 0.

$z_j$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la demanda del nodo  $i$  es cubierta; caso contrario, 0.

De tal forma, se presenta la formulación del modelo matemático del MCLP.

#### **Función objetivo:**

$$\max Z = \sum_i h_i \cdot z_i \quad (16)$$

**Sujeto a:**

$$z_i \leq \sum_j a_{ij} \cdot x_j \quad \forall i \quad (17)$$

$$\sum_j x_j \leq P \quad \forall i \quad (18)$$

$$Z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \quad (19)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (20)$$

La función objetivo (16) maximiza la cobertura de la demanda. La restricción (17) determina que cada nodo demanda  $i$  sea cubierto por al menos una de las potenciales instalaciones  $j$ . La restricción (18) restringe que la cantidad de instalaciones a ubicar se encuentre dentro del presupuesto  $P$ . Las restricciones (19) y (20) representan la integralidad de las variables.

#### 1.4.5. Minimum Impedance Model (P-median)

El Minimum Impedance Model (P-median) presenta como objetivo minimizar la distancia entre la demanda a atender y la ubicación de la instalación más cercana que pueda atenderla (Current et al., 2002). El modelo p-median fue inicialmente propuesto por S. L. Hakimi (1964) para determinar la ubicación óptima de centros de comunicación que garantice su transmisión de señal hacia las estaciones de policía.

La notación del modelo matemático del p-median se presenta de la siguiente manera.

$i$  = índice de los nodos demanda.

$j$  = índice de las instalaciones.

$h_i$  = cantidad de la demanda en el nodo  $i$ .

$d_{ij}$  = distancia entre el nodo demanda  $i$  y la potencial localización  $j$  de la instalación.

$Y_{ij}$  = variable que toma el valor de 1 si la demanda del nodo  $i$  es asignada a ser cubierta por la instalación localizada en  $j$ ; caso contrario, 0.

$x_j$  = variable binaria que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en la ubicación  $j$ ; caso contrario, 0.

$P$  = cantidad de instalaciones disponibles a ser localizadas.

De tal forma, se presenta la formulación del modelo matemático del p-median.

**Función objetivo:**

$$\min Z = \sum_j \sum_i h_i \cdot d_{ij} \cdot Y_{ij} \quad (21)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (22)$$

$$\sum_j x_j = P \quad \forall i \quad (23)$$

$$Y_{ij} \leq x_j \quad \forall i, j \quad (24)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (25)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (26)$$

La función objetivo (21) minimiza la distancia desde la demanda hacia la ubicación de la instalación. La restricción (22) asegura que cada nodo demanda  $i$  es asignado a una instalación  $j$  para ser cubierto, mientras que la restricción (23) indica la cantidad de

instalaciones a ser localizadas. La restricción (24) determina que si el modelo no asigna una cantidad de demanda al nodo  $i$  en la instalación  $j$ , entonces el nodo  $i$  no requiere ser cubierto por las instalaciones. Las restricciones (25) y (26) aseguran la integralidad de las variables consideradas en el modelo.

De acuerdo a los modelos presentados: Location Set Covering Problem (LSCP), Maximal Coverage Location Problem (MCLP) y Minimun Impedance Model (P-median). Shuo Yang (2017) en su estudio, sobre mejorar la cobertura del servicio postal brindado en una ciudad de Noruega, realiza una comparación de estos modelos donde destaca las características de cada tipo de problema.

Tabla 3. Comparación de los modelos de localización presentados.

Modelo de localización aplicado	Objetivo del modelo	Aplicación a mejorar	¿Número definido de instalaciones?	¿Cobertura a del 100%?	¿Distancia de cobertura definida?
<b>SCLP</b>	Minimizar la cantidad de instalaciones a localizar	Disponibilidad	No	Sí	Sí
<b>MCLP</b>	Maximizar la cobertura de atención	Eficiencia	Sí	No	Sí
<b>P-median</b>	Minimizar la distancia entre las instalaciones y la demanda a atender	Disponibilidad	Sí	No	No

Nota. Tomado de "Improving the performance of Service Network through Location-based Optimization and Analysis of - a case study on postal service in a city in Northern Norway", por Yang, 2017.

## **CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE CASOS**

A partir de los conceptos y metodologías presentadas, se procede a detallar casos de estudio donde se describa la utilización de las herramientas relacionadas con la utilización de un sistema de alerta temprana y revisión de la aplicación de un modelo matemático de localización. Mediante la descripción de estos casos, se pretende mostrar la aplicación de las metodologías presentadas en el marco teórico.

### **2.1. Aplicación del Sistema de Alerta Temprana**

La aplicación de los sistemas de alerta temprana para la prevención de los efectos provocados por los sismos presenta los avances que se han realizado en distintos países con el objetivo de mitigar el impacto que un evento sísmico puede provocar en una población. De esta forma, se revisa la situación que conlleva la implementación de los sistemas de alerta temprana para Japón y México.

#### **2.1.1. Sistema de Alerta Temprana de Japón**

En Japón, la Ley de Servicio Meteorológico establece que la Agencia Meteorológica de Japón o JMA, es la entidad encargada de brindar información sobre los fenómenos naturales relacionados al clima, sismos, tsunamis y actividades volcánicas. Esta ley también establece que se debe comunicar sobre un “pronóstico” de ocurrencia de un fenómeno natural, y que se debe “advertir” anticipadamente sobre la llegada de un evento que ocasione daños severos en la población (Japan Meteorological Agency, 2007).

Durante comienzos de los años 70, se requirió incluir un sistema de apagado automático en las estufas de kerosene para evitar la generación de incendios devastadores como el de 1923 donde aproximadamente 105 000 personas fueron calcinadas por el fuego inminente que se generó; de esta forma, las empresas comenzaron a introducir este sistema automático que, ante

un fuerte movimiento, la llama fuese apagada (Takamatsu, 2009). Este sistema fue considerado como un método de alerta temprana para sismos.

De la misma forma, con el objetivo de desarrollar un sistema de prevención para detener los trenes bala durante la ocurrencia de sismos, en 1992 se introdujo el Sistema de detección y alerta de sismos o Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS, según siglas en inglés) (Nakamura, Saita, 2007). Este sistema permitió que se registrara la intensidad de los sismos mediante distintos sismógrafos y acelerómetros distribuidos en distintas regiones del país; a partir de tal medida, se determinan los parámetros del sismo para enviar la información a la Agencia Meteorológica de Japón o JMA en tiempo real. A partir de esta información, se establece la intensidad máxima que presentará el sismo y, de acuerdo a las escalas de intensidad se transmite la alerta hacia la población.

A partir de agosto del 2006, el sistema de alerta temprana se encontró implementado en todo Japón, donde se brindó la alerta de prevención a usuarios específicos como estaciones de luz, estaciones de tren y entidades gubernamentales que puedan tomar acciones para reducir el impacto en la población; y desde octubre del 2007, la población presenta diversos canales por los cuales puede recibir la alerta y tomar precauciones para reducir el impacto de la actividad sísmica (Hoshiba, Kamigaichi, Saito, Tsukada, Hamada, 2008). Hasta finales del 2009, la Agencia Meteorológica de Japón o JMA mediante las alarmas emitidas por el sistema de alerta temprana, pudo alertar más de 2100 sismos a entidades específicas y se alertó 11 sismos a la población, siendo estos valores representativos para justificar la importancia del desarrollo del sistema de alerta en Japón (Japan Meteorological Agency, 2007).

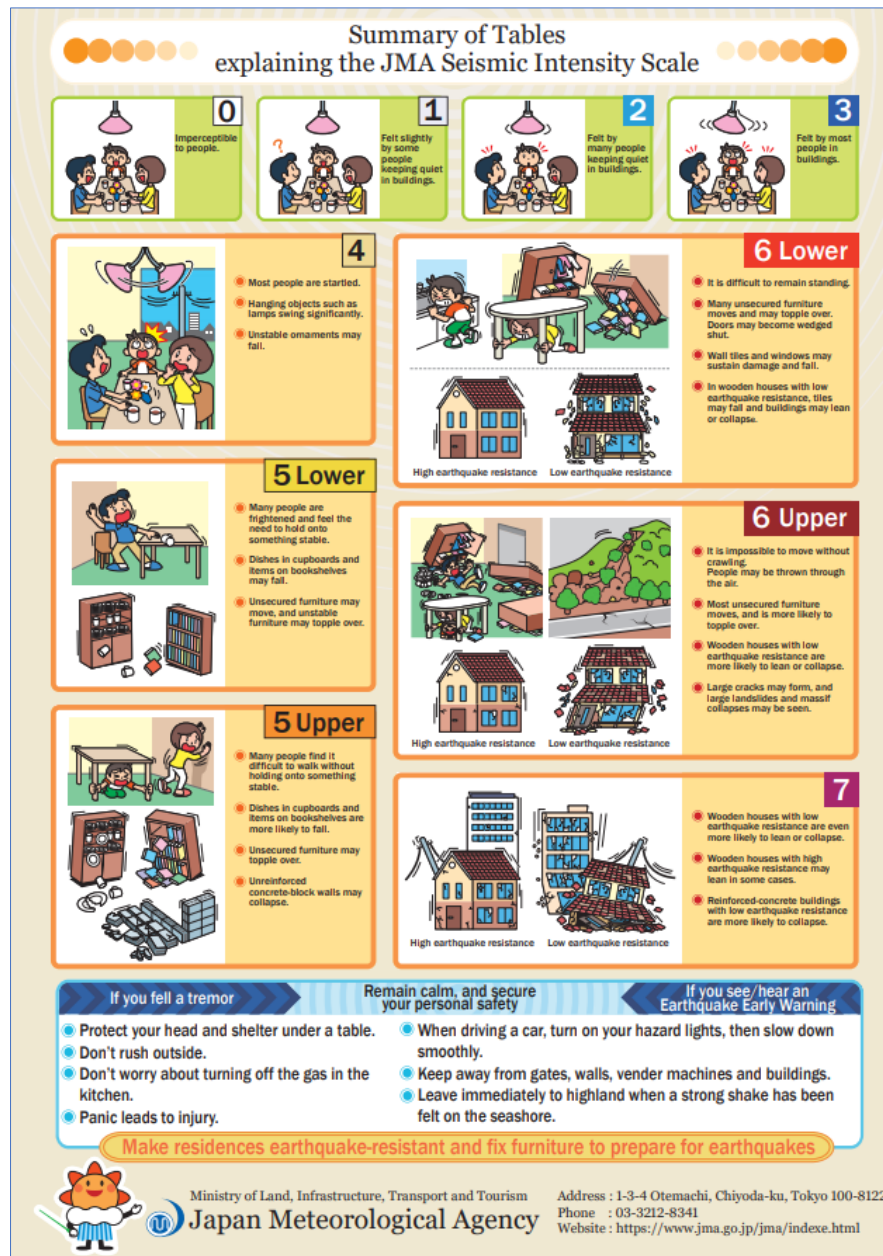


Figura 10. Presentación de información sobre escalas sísmicas de JMA.

Tomado de Listado de tablas de explicación de intensidades sísmicas, por Japan Meteorological Agency.

A diferencia de otras escalas de intensidad que son utilizadas en distintos países (escala MM y MSK), el sistema de alerta de Japón presenta siete niveles que clasifican al sismo de acuerdo a su impacto en la población, donde se detalla que se emite una alerta sísmica cuando el evento presenta una intensidad mayor igual a 5 Lower, que presenta la situación en la que los objetos caen y los muebles se balancean.



El monitoreo de las ondas sísmicas se realiza mediante estaciones sísmicas localizadas en intervalos de 20 km por el territorio japonés. Cuando la intensidad sísmica es mayor a la escala 3, se emite una alerta de prevención sobre el movimiento; sin embargo, debido a las actualizaciones de las estimaciones, si la intensidad llegase a alcanzar la escala 5 Lower, la JMA emitirá una alerta de advertencia principalmente en las regiones más cercanas al epicentro del sismo.

La comunicación de las alertas para la población se realiza mediante los canales estandarizados donde se encuentran las señales de radio, anuncios televisivos, difusión por teléfonos celulares; así como, red de alarmas sonoras proporcionados por los gobiernos locales, que se encuentran en distintos edificios y postes de la ciudad; así mismo, la comunicación hacia las entidades específicas se realiza mediante los mismos medios que facilitan la llegada de la alerta (Japan Meteorological Agency. 2007).

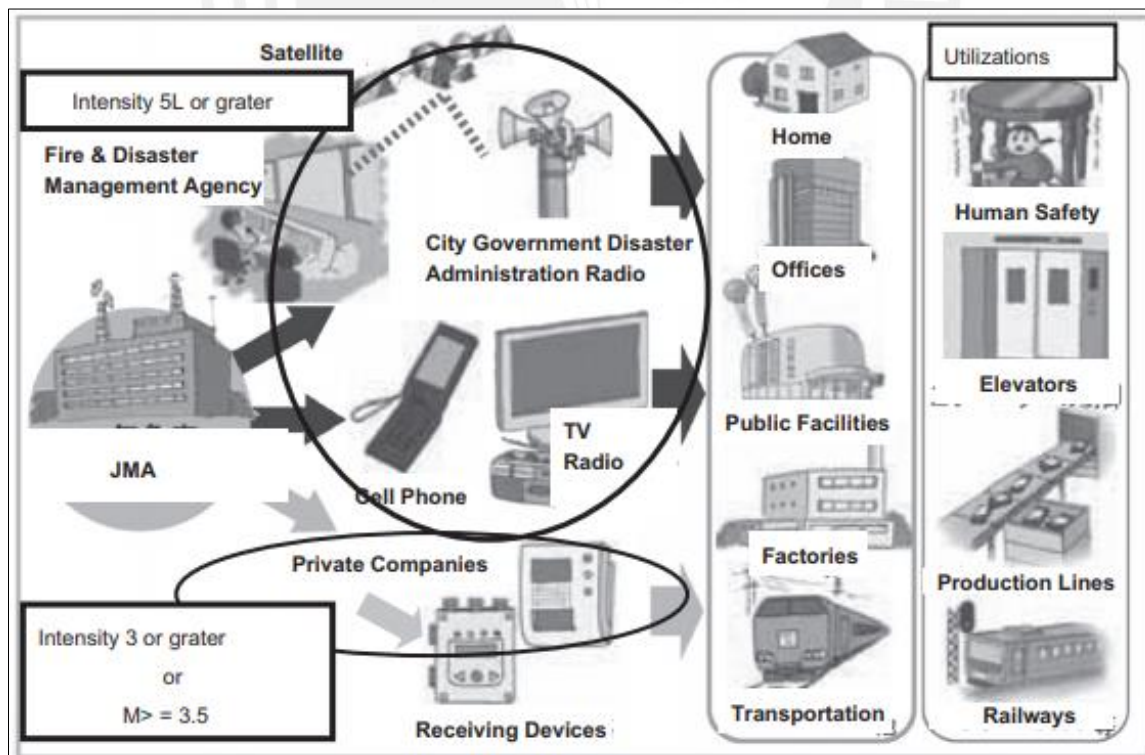


Figura 11. Sistema de comunicación para alertas sísmicas

Tomado de "Earthquake Early Warning System", por Japan Meteorological Agency, 2007.

Cabe resaltar que la Agencia Meteorológica de Japón, o JMA, no solo se centra en difundir las alertas de prevención de sismos, sino que además vela que la población tenga el conocimiento sobre las acciones a tomar para mitigar los impactos del sismo, motivo por el cual la JMA constantemente desarrolla folletos y videos que brindan recomendaciones sobre las acciones que se deben de realizar y cuáles no; y principalmente, son estos folletos los cuales se distribuyen en las escuelas del país con el fin de maximizar la educación sobre prevención de riesgos sísmicos.

### **2.1.2. Sistema de Alerta Temprana de México**

Después del terremoto de 8.1 Mw que afectó la ciudad de Michoacán en 1985, las autoridades gubernamentales de México propusieron desarrollar el Sistema de Alerta Sísmica para México (SASMEX) con el objetivo de que los habitantes de la ciudad pudiesen ser alertados antes de la llegada de un movimiento sísmico originado en la costa del Pacífico, principalmente en la conocida “Brecha de Guerrero” (Espinosa-Aranda, Cuéllar, Rodríguez, Frontana, Ibarrola, Islas, García, 2011).

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) inició el desarrollo del SASMEX en 1989 y fue puesto en funcionamiento desde 1993 al haber instalado una red de estaciones sísmicas distribuidas a lo largo de la costa pacífica de México para difundir las señales de alerta a distintas ciudades del país ante un sismo con magnitud mayor a 6.0 Mw (Cuéllar, Suárez y Espinosa-Aranda, 2017). Actualmente, las estaciones sísmicas han sido instaladas en las regiones urbanas propensas a una actividad sísmica lo que ha permitido incrementar el rango de detección de sismos.

La implementación del sistema de alerta temprana en México ha permitido anticipar la llegada del movimiento con una ventaja de 60 segundos para emitir la alerta a la población (Kanamori, 2005). De esta forma, Espinosa-Aranda, Cuéllar, Ibarrola, Islar, García, Rodríguez

y Frontana (2012) en su análisis del sistema de alerta temprana de México (SASMEX), señalan que el terremoto de mayo de 1993 con magnitud de 6.0 Mw, se pudo anticipar 65 segundos antes de su llegada a la ciudad de México para emitir la alerta temprana y desplegar los planes de evacuación de las zonas.

El sistema de detección de sismos inicia con la detección de las energías sísmicas (ondas P y S) que son registradas por los sismógrafos en las estaciones sísmicas; se transmite la información hacia las centrales de control donde se realiza el análisis del registro tomado del epicentro para así contrastarlo con data histórica a fin de identificar la magnitud máxima del evento. Después de conocer la magnitud del evento y si esta supera la magnitud de 6.0 Mw, la estación central activa automáticamente la alerta temprana mediante los transmisores de la señal para alertar a la población.

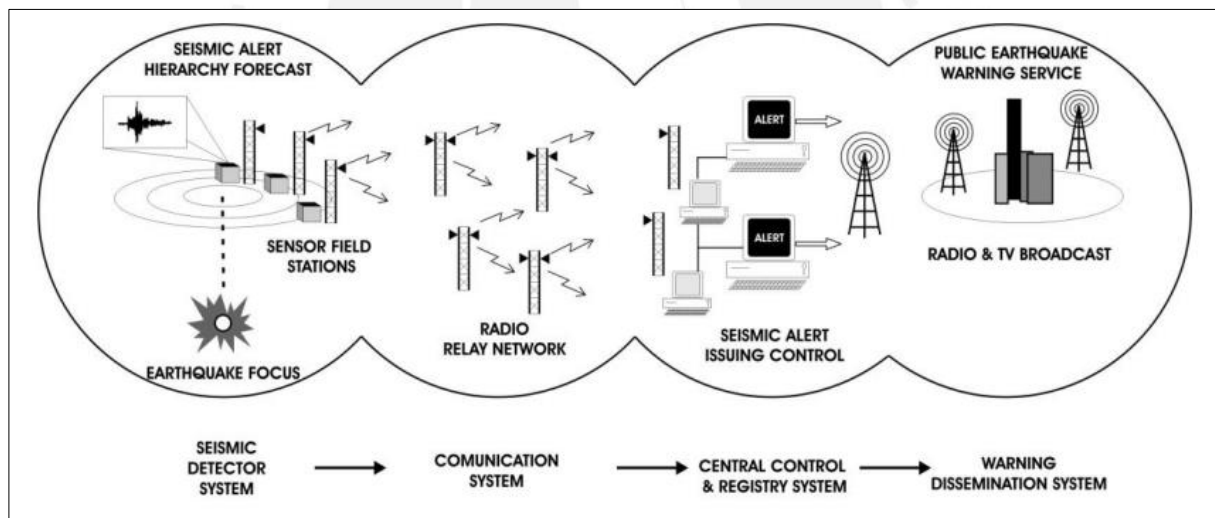


Figura 12. Etapas del Sistema de Alerta Temprana de México (SASMEX).

Tomado de "The Seismic Alert System of Mexico (SASMEX) and their Alert Signals Broadcast Results", por Espinosa-Arana et al., 2012.

Para emitir la alerta previa, se instalaron altavoces en edificios públicos y privados, escuelas y postes de la ciudad que emitiesen la alerta. Años después, la población podía recibir la señal mediante tres canales: altavoces, radio AM/FM y medios digitales. No obstante, uno

de los principales medios que ha permitido alertar a mayor población han sido los altavoces localizadas en distintas áreas de la ciudad, motivo por el cual desde el 2015, el gobierno de la Ciudad de México decidió instalar una red de 12,000 altavoces en los postes que esté distribuidos en la ciudad (Espinosa-Aranda et al., 2012).

Así también, en una conferencia realizada al alcalde de la Ciudad de México, recopilada por el diario Global Times China (2017), se precisó que la Ciudad de México estará reforzando su sistema de alerta sísmica mediante la instalación de 1 000 nuevos parlantes o sirenas en las calles, que se sumarán a las 8 200 sirenas que ya cuenta la ciudad desde 2015. Esto a su vez demuestra la necesidad de mejorar el sistema de alerta de la Ciudad a fin de que se pueda ampliar la cobertura de las alarmas ante la presencia de un futuro sismo.

## **2.2. Modelos matemáticos de localización**

Se presentan dos casos de estudio donde se han desarrollado modelos matemáticos de localización que permitan mitigar los impactos de los sismos en la población; el primero de estos presenta como objetivo determinar la localización óptima de refugios que permitan acoger a las personas que han sido afectadas por la ocurrencia de sismos; y el segundo caso busca encontrar una solución que permita localizar sirenas de emergencia para cubrir completamente la región de estudio.

### **2.2.1. Modelo multi-criterio para la localización de refugios en caso de sismos**

**Título:** Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban planning

**Autores:** Jinghai, X., Xiaozhe, Y., Dingchao, C., Jiwen, A. y Gaozong, N.

En este caso, Jinghai, Xiaozhe, Dingchao, Jiwen y Gaozong (2016) proponen un modelo multi-criterio de localización de refugios en casos de sismos el cual se basa en los siete principios para ubicar refugios de evacuación en caso de terremotos. Así mismo, el modelo se

apoya con el Sistema de Información geográfica (GIS) para la identificación del rango de cobertura de los refugios. El modelo que formulan permite primero identificar los potenciales refugios a ubicar, analiza la cobertura de los refugios para atender a la mayor área posible y finalmente determina la ubicación del refugio.

En la investigación, Jinghai Xu et al. (2016) describen los siete principios de localización de refugios que fueron propuestos por distintos autores y, principalmente, toman en consideración la norma GB 50413-2007 de China donde se describen los siete principios: seguridad, conocimiento del terreno, refugio vecino más cercano, factor económico, rango de distancia, máxima cobertura y la capacidad de atención, los cuales permiten determinar las cualidades de los refugios a considerar.

De esta forma, Jinghai Xu et al. (2016) formulan un modelo multi-criterio que cumpla con los principios mencionados; el modelo diseñado se basa en el modelo P-median y Location Set Covering Problem (LSCP). La formulación propuesta se presenta a continuación.

**Función objetivo:**

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot y_i \quad (27)$$

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot x_{ij} \quad (28)$$

$$\text{Max} \sum_{j=1}^n A_j \quad (29)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{j \in W_i} x_{ij} \geq 1, i \in V \quad (30)$$

$$pop_j \geq \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_{ij} \quad (31)$$

$$d_{ij} \leq t_{ij} \leq r_j \quad (32)$$

$$\sum_{j=1} A_j \geq A_{all} \cdot \delta_{ratio} \quad (33)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, j \in W, i \in V \quad (34)$$

Donde  $i$  es el índice de los nodos demanda,  $j$  es el índice de las potenciales ubicaciones de los refugios y  $t_{ij}$  es la distancia permitida de evacuación desde el nodo demanda  $i$  hacia el refugio  $j$ . Así mismo,  $y_j$  es una variable binaria que toma el valor de 1 si el refugio se colocará el refugio en el nodo  $j$  y  $a_j$  es la cantidad de demanda del nodo  $i$ . Del mismo modo,  $x_{ij}$  es una variable binaria que toma el valor de 1 si la demanda del nodo  $i$  es cubierta por el refugio  $j$ , y  $A_j$  representa el área de cobertura del refugio  $j$ . El conjunto de potenciales refugios se representa con  $W$ , siendo  $W_i$  el grupo de refugios que cubren la demanda del nodo  $i$  que pertenece al conjunto de nodos de demanda  $V$ . Adicionalmente, la capacidad del refugio localizado en  $j$  se denomina como  $pop_j$ ; la distancia de atención desde la demanda  $i$  hacia el refugio  $j$  se representa con  $d_{ij}$ ; y  $r_j$  indica el máximo rango de cobertura del refugio  $j$ . Finalmente,  $A_{all}$  es el área total de estudio, y  $\delta_{ratio}$  es el mínimo porcentaje de cobertura que los refugios deben de satisfacer para el área de estudio.

Respecto a las funciones objetivo del modelo propuesto, la función (27) minimiza la distancia total entre los refugios y la población que requiere ser cubierta; la función (28) busca que los refugios abarquen la mayor cantidad de demanda posible, y la ecuación (29) maximiza la cobertura de los refugios. Estas tres ecuaciones han sido planteadas para cumplir con los

principios de localización de refugios mencionados; de la misma forma, las restricciones están relacionadas con estos principios.

La restricción (30) que cada demanda del nodo  $i$  sea cubierta por al menos un refugio  $j$ . La restricción (31) garantiza que la demanda a atenderse en cada refugio no supere la capacidad del mismo; en cuanto a la restricción (32), establece que la distancia entre la demanda  $i$  y el refugio  $j$  no debe ser mayor al rango de cobertura; de lo contrario, la demanda no podrá ser atendida por tal refugio. La restricción (33) establece que la cobertura de los refugios debe garantizar como mínimo el porcentaje establecido  $\delta_{ratio}$ , siendo este porcentaje determinado por las entidades encargadas del desarrollo del proyecto. Finalmente, la restricción (34) representa la integralidad de las variables.

### Resultados obtenidos

La solución del modelo planteado se presenta en tres pasos; el primero es determinar la cantidad de refugios a localizar. Para esta elección, el número de refugios se calcula mediante la ecuación (35) donde  $N_0$  es el número de refugios,  $A_{all}$  es el área de estudio a ser cubierta,  $R$  es la cobertura máxima de cada refugio que, de acuerdo al estándar nacional de China, es de 2km.

$$N_0 = A_{all}/2\pi R \quad (35)$$

El área a ser cubierta puede ser cubierta en algunos sectores por más de un refugio, motivo por el cual la cantidad  $N_0$  determinada debe ser ajustada con un coeficiente  $K$  para estimar el valor final de  $N$ . De acuerdo a la decisión de los autores basada en su experiencia, se escogió un  $K = 4.5$ , que determina que se deben localizar 72 refugios en el área.

Así mismo, para determinar la localización de los refugios, se investigaron los sitios candidatos para garantizar que existiesen edificios como escuelas y parques que faciliten la

colocación del refugio. Como resultado, 61 refugios fueron localizados en la región de Yangzhou, dando una cobertura de 62% y con un área total de 258.9 km<sup>2</sup> para la instalación de los refugios.

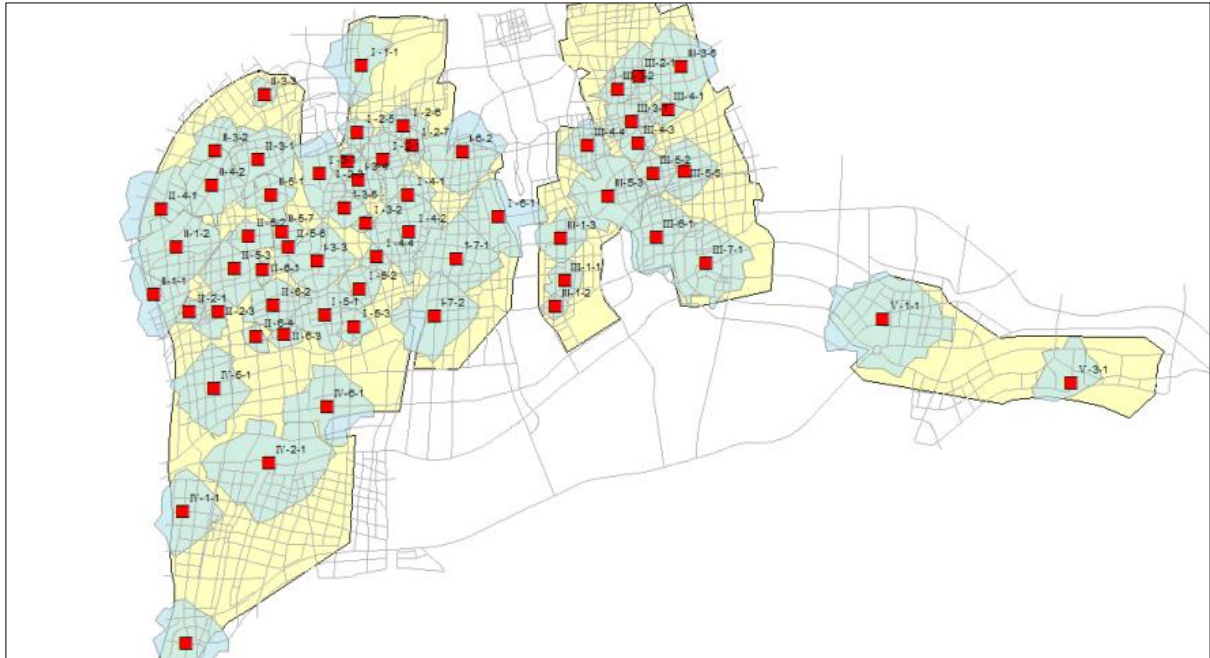


Figura 13. Resultados del modelo de localización de refugios de evacuación de Yangzhou.

Tomado de “Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban planning”, por Jinghai, X. et al., 2016.

### 2.2.2. Modelo de localización de sirenas de emergencia

**Título:** Locating Emergency Warning Sirens

**Autores:** Current, J. y Morton, O. (1992)

En este caso, Current y Morton (1992) desarrollan la siguiente investigación con el objetivo de mejorar la cobertura de las sirenas localizadas en una ciudad de EE. UU., debido a que estos instrumentos contaban con tecnología anticuada lo cual requería que constantemente se les brinde mantenimiento o reparación para su funcionamiento adecuado.



Los autores detallan que la localización actual de las sirenas se desarrolló mediante la premisa de que las sirenas debían de cubrir completamente la ciudad, y que solo se decidiría por optar dos tipos de sirenas: omnidireccionales con un costo de \$9 000 y un radio de 3 200 pies, y las sirenas giratorias cuyo costo es de \$11 000 y con cobertura de 4 800 pies. De esta forma, la planificación se realizó manualmente mediante la superposición de discos que representaran el radio de cobertura de cada sirena sobre un mapa a escala de la ciudad. Luego, si la ubicación escogida no era factible, la sirena se ubicaba en la ubicación más próxima posible; la factibilidad que se consideraba era la accesibilidad para el mantenimiento, proximidad a áreas sensibles como hospitales, restricciones de ingreso. Este proceso de localización empírica se realizó hasta que todas las sirenas pudiesen ubicarse en puntos factibles con lo cual se obtuvo que se debían de colocar 19 sirenas omnidireccionales.

Si bien no se realizó la cobertura completa de la ciudad, el gobierno local consideró que la propuesta era la mejor alternativa y que se debía realizar una segunda fase en la que se tratase de cubrir las áreas restantes mediante la implementación de sirenas adicionales o incluir un método de comunicación adicional como el ruteo de patrullas policiales que emitiesen una alarma sonora similar.

De esta forma, la implementación de las sirenas se dividió en dos fases: Fase I donde se colocarían 10 sirenas, y las restantes debían ser instaladas en la Fase II. No obstante, durante el desarrollo de la Fase I, Current y Morton (1992) realizan la propuesta de desarrollar un modelo matemático que evaluase las ubicaciones escogidas para las sirenas, y que también considerara el costo de elegir las sirenas omnidireccionales sobre otro tipo de sirenas.

La ciudad de estudio presenta una superficie de 17 millas cuadradas con una población de aproximadamente 16 000 personas; así mismo, el gobierno local estableció un presupuesto de \$200 000 para la implementación del sistema de sirenas de emergencia.

### Planteamiento del modelo

La formulación del modelo se presenta a partir de las asunciones que influyen su desarrollo, y que se presentan a continuación.

- (1) Se presenta un número finito de potenciales ubicaciones para las sirenas.
- (2) La demanda a cubrir se representa como un número finito.
- (3) Se considera que la demanda es cubierta si se encuentra dentro del radio de cobertura de la sirena escogida.
- (4) Toda la demanda debe ser cubierta.
- (5) Se cuentan con dos tipos de sirenas: omnidireccional y giratoria.

Las asunciones (1) y (2) facilitan la formulación del problema al representar con un nodo tanto a la demanda a cubrir como a las posibles ubicaciones de las sirenas. La asunción (3) verifica que el modelo cumpla con cubrir a la demanda, mientras que la asunción (4) garantiza que toda la demanda debe ser cubierta, y finalmente, la asunción (5) presenta la decisión que se toma antes del desarrollo del problema, puesto que la ciudad ha optado por comprar sirenas omnidireccionales que, si bien presentan una cobertura menor, resultan más asequibles en cuanto al presupuesto para el sistema de sirenas.

A partir de las asunciones presentadas, Current y Morton (1992) presentan la formulación de un modelo matemático que minimice el costo de cobertura de la población sin considerar la elección del tipo de sirena, puesto que lo representan como una variable binaria que se encontrará integrada en el modelo.

### Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_j c_j^O \cdot X_j^O + \sum_j c_j^R \cdot X_j^R \quad (36)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_j X_j^O + \sum_j X_j^R \geq 1 \quad (37)$$

$$X_j^O, X_j^R \in \{0,1\} \quad (38)$$

Donde,

$$X_j^O = \begin{cases} 1, & \text{si la sirena omnidireccional es localizada en la ubicación } j \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$X_j^R = \begin{cases} 1, & \text{si la sirena giratoria es localizada en la ubicación } j \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$c_j^O = \text{costos de una sirena omnidireccional en la ubicación } j$$

$$c_j^R = \text{costos de una sirena giratoria en la ubicación } j$$

$$I = \text{conjunto de nodos demanda}$$

$$O = \text{conjunto de ubicaciones potenciales para una sirena omnidireccional}$$

$$R = \text{conjunto de ubicaciones potenciales para una sirena giratoria}$$

$$O_i = \text{conjunto de potenciales sirenas omnidireccionales que cubren la demanda del nodo } i$$

$$R_i = \text{conjunto de potenciales sirenas giratoria que cubren la demanda del nodo } i$$

La función objetivo (36) minimiza el costo total de implementar el sistema de alerta temprana. La restricción (37) asegura que la demanda del nodo  $i$  sea cubierta; es decir, que se encuentre dentro del radio de cobertura de la sirena; la restricción (38) establece la integralidad de las variables de decisión.

A partir de esta formulación, si se contara con un solo tipo de sirena para la cobertura de la ciudad, la formulación del modelo se convertiría a un modelo de Set Covering Location Problem (SCLP) que fue propuesto por Toregas, C. et al. (1971).

Para realizar la delimitación de los nodos en la ciudad, los autores optaron por superponer un mapa con celdas de 1 500 por 1 500 pies, la cual fue utilizada por los planificadores del gobierno local. Mediante esta limitación, la región quedó distribuida en 238 nodos que representan el conjunto de nodos demanda que deben ser cubiertos, así como las potenciales ubicaciones de las sirenas. La figura 14 presenta la localización inicial de las sirenas de la Fase I las cuales se encuentran numeradas y las posiciones que tendrían las sirenas a localizarse en la Fase II.

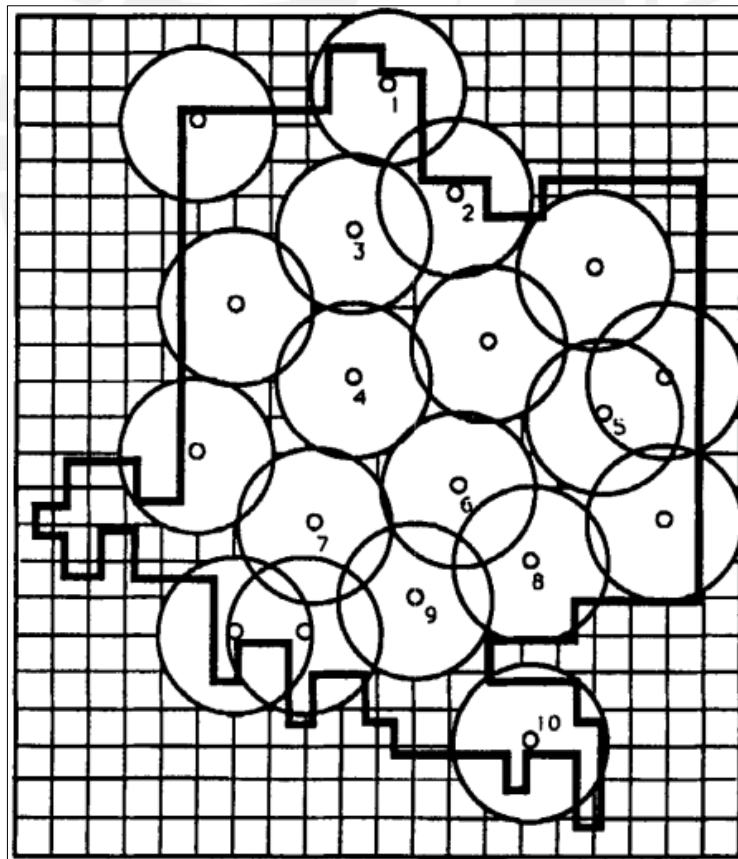


Figura 14. Mapa de localización inicial de las sirenas de una ciudad en EE.UU.

Tomado de "Location Emergency Warning Sirens", por Current y Morton, 1992.

Del mismo modo, para decidir la distribución entre las sirenas omnidireccionales y giratorias, los autores presentan nueve escenarios donde se realiza el análisis para determinar la cantidad óptima a requerir de cada tipo de sirena, con lo cual se pueda obtener el menor costo posible asociado a su implementación.

Tabla 4. Resumen de los resultados de los nueve escenarios analizados

Scenario	Type of Siren at 10 Fixed Sites	Type of Siren Allowed at Other Locations	Number of Omni-directional Sirens Sited	Number of Rotating Sirens Sited	Total Number of Sirens Sited	Total Cost (\$1000)	Solution Times (CPU Mins.)
1A	O	Either	10	8	18	178	.67
1B	O	R	10	8	18	178	.67
1C	O	O	29	0	29	261	.27
2A	R	Either	5	12	17	177	.16
2B	R	R	0	17	17	187	.12
2C	R	O	10	10	20	200	.16
3A	Either	Either	9 (7 at fixed sites)	8	17	169	.81
3B	Either	R	8 (8 at fixed sites)	9	17	171	1.20
3C	Either	O	15 (5 at fixed sites)	5	20	190	.30

Notes: O is omnidirectional sirens. R is rotating sirens.

Nota. Tomado de "Location Emergency Warning Sirens", por Current y Morton, 1992.

A partir de la tabla resumen de los escenarios evaluados, se observa que el escenario 3A presenta el menor costo total de la solución lo cual se explica debido a que no presenta requerimiento sobre un tipo de sirena en específico. Este escenario indica que se deben ubicar nueve sirenas omnidireccionales, de las cuales siete presentan ubicación fija, y ocho sirenas giratorias. De esta solución, la implementación realizada en la Fase I solo deberá presentar cambios menores para ajustarse a las especificaciones que brinda la solución. Por último, el costo total de esta solución es de \$169 000.

No obstante, si el gobierno local decidiese mantener la decisión de solo contar con sirenas omnidireccionales, el escenario 1C presenta la mejor solución con lo que se incurre en un costo total de \$261 000 al requerir 29 sirenas de este tipo para cubrir toda la demanda.

Finalmente, Current y Morton (1992) concluyen que si bien el escenario 3A brinda la solución de menor costo (Gráfico 5A), es preferible eliminar la sirena ubicada en la posición 3 debido a que esta está siendo cubierta en mayor proporción por otras sirenas, con lo cual se logra reducir el presupuesto establecido. De ello, el gráfico 5B presenta la cobertura que se brinda a la región luego de haber retirado la sirena 3.

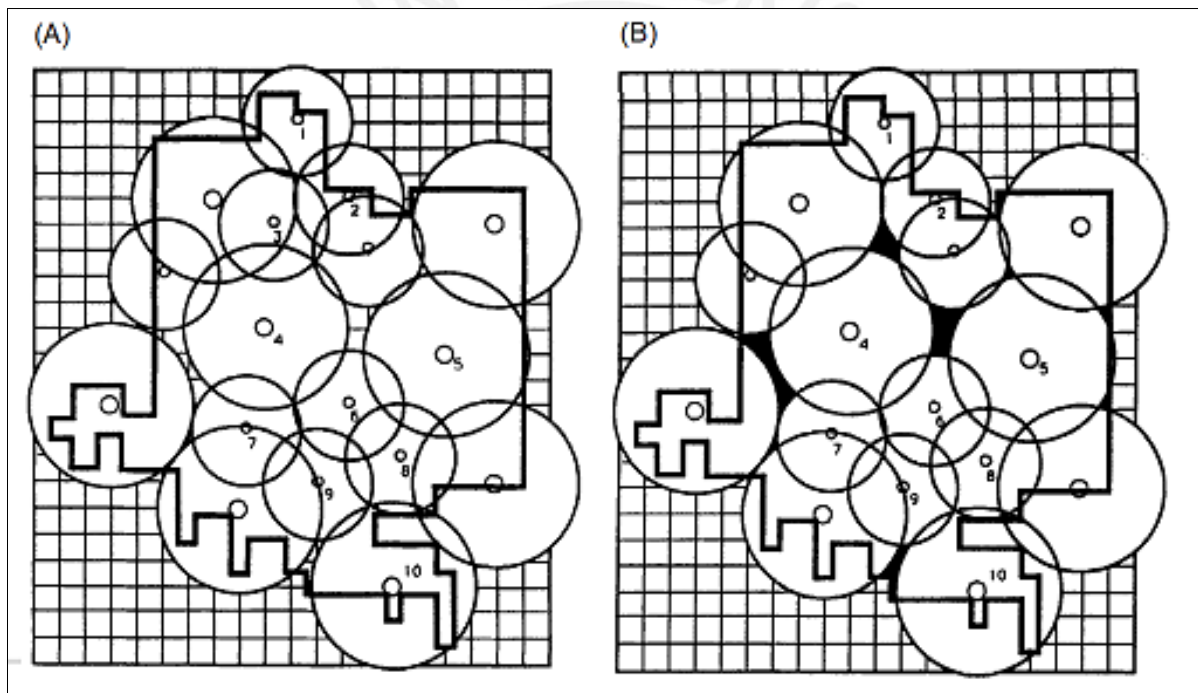
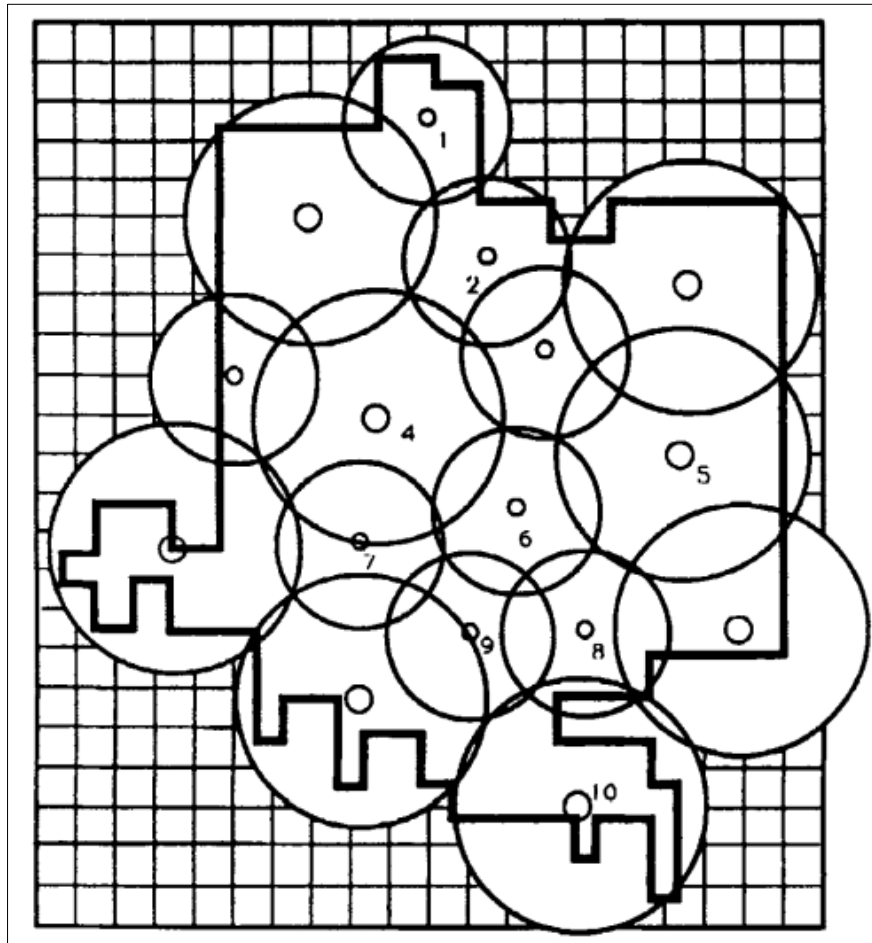


Figura 15. Localización inicial de sirenas en escenario 3A (A) y localización del escenario 3A al retirar la sirena de ubicación en punto 3 (B).

Tomado de “Location Emergency Warning Sirens”, por Current y Morton, 1992.

Por último, si bien el modelo matemático ha presentado la mejor solución para la cobertura de la región que cumpla con las restricciones presentadas, se observa que el gráfico 5B aún presenta áreas que no está siendo cubiertas pero que, si se realiza una modificación manual, se puede incrementar la cobertura final de la ciudad. Con ello, se realiza los cambios

en las ubicaciones de algunas sirenas con lo cual también se garantiza que estas cuenten con ubicaciones factibles.



*Figura 16. Localización final del escenario 3A al retirar la sirena ubicada en la posición 3.*

*Tomado de "Location Emergency Warning Sirens", por Current y Morton, 1992.*

## CONCLUSIONES

- Se detallaron las características de un sismo y la información proporcionada por un sismo que al ser identificada por una red sísmica permite analizar los peligros sísmicos y predecir sus efectos, y los planteamientos iniciales que dieron origen a la concepción y el desarrollo de un sistema de alerta sísmica que pudiese prevenir a la población sobre la llegada de un sismo a un área específica.
- La prevención de ocurrencia de terremotos en tiempo real fue inicialmente desarrollada para la alerta al sistema de trenes en Japón; sin embargo, la aplicación de un sistema de alerta temprana ha sido implementado en distintos entornos como lo es en los sistemas de alertas sísmicas en varios países.
- Se presentó el uso de los sistemas de alerta sísmica tanto de México como de Japón para la toma de decisiones en tiempo real y la gestión del riesgo sísmico a fin de reducir su impacto en la población, donde se ha evidenciado la eficiencia de su uso y de los resultados beneficiosos para la población en cuanto a alertarlos sobre la llegada de un sismo y así buscar que puedan tomar las acciones de prevención con mayor prontitud.
- Se precisaron las características de un sistema de alerta sísmica y sus tipos de acuerdo a la necesidad de la región a ser alertada, adicionalmente se pudo observar que una de las fases más importantes de este sistema es la emisión de la alarma que garantiza que la población perciba la alerta; de esta forma, se presentaron los casos de implementación de este sistema en México y Japón donde el principal medio de notificación resultó siendo las sirenas de emergencia ubicadas a lo largo de las áreas de cobertura.
- De acuerdo al análisis realizado a los modelos de localización y cobertura, se logra concluir la factibilidad en su uso a fin de optimizar la ubicación de sirenas de emergencia para la difusión de la alarma temprana emitida por un sistema de alerta sísmica. Este tipo



de modelos permitirá determinar la cantidad óptima de sirenas y maximizar la cobertura del área a ser notificada de tal forma que pueda cumplir con los requisitos a ser considerados por el Gobierno ante la implementación de un sistema de alerta sísmica para el Perú.

- Si bien los sistemas de alerta sísmica permiten notificar la llegada de un sismo, el margen de tiempo de advertencia resulta siendo de pocos segundos para permitir la evaluación de decisiones, por lo que resulta necesario que la población tenga un claro conocimiento de las acciones rápidas a realizar para tomar precaución como ubicarse en lugares seguros, o evacuar inmediatamente la zona.



## BIBLIOGRAFÍA

Blaikie, P., Cannon, T., Wisner, B., Davis I. (1996). *Vulnerabilidad*. El entorno social, político y económico de los desastres. La Red. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Bolt, B.A. (1994) Seismological Information Necessary for Beneficial Earthquake Risk Reduction. *Issues in Urban Earthquake Risk*, 271. Springer, Dordrecht.

Ccallo, F. (2003). *La magnitud de los sismos locales y regionales ocurridos en Perú a partir de la onda LG y la duración de su registro: Efectos y daños en la ciudad de Moquegua debido al sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

Church, R., ReVelle, C. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science*, 32(1), 101-118.

Cooper, J. D. (1868). Earthquake indicator. *The San Francisco Daily Evening Bulletin*. November 3, 1868.

Cuéllar, A., Suárez, G., Espinosa-Aranda, J. M. (2017). Performance Evaluation of the Earthquake Detection and Classification Algorithm 2(tS-tP) of the Seismic Alert System of Mexico (SASMEX). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1451-1463.

Current, J., O Kelly, M. (2012). Location Emergency Warning Sirens. *Decision Sciences*, 23(1), 221-234.

Current, J., Daskin, M., Schilling, D. (2002). Discrete network location models. *Facility location: applications and theory* (pp. 81-118).

Espinosa-Aranda, J. M., Cuéllar, A., Ibarrola, G., Islar, R., García, A., Rodríguez, F. H., Frontana, B. (2012). The Seismic Alert System of Mexico (SASMEX) and their Alert Signals Broadcast Results. In 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012, Lisboa.

Espinosa-Aranda, J. M., Cuéllar, A., Rodríguez, F. H., Frontana, B., Ibarrola, G., Islas, R., García, A. (2011). The seismic alert system of Mexico (SASMEX): Progress and its current applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2), 154-162.

Global Times China. (2017). “How many seconds can Earthquake Early Warning system save for you?”. *Infographics*. Recuperado de <http://www.globaltimes.cn/content/1060460.shtml>.

Global Times China. (2017). Mexico City to reinforce earthquake alert system. *World*. Recuperado de <http://www.globaltimes.cn/content/1070281.shtml>.

Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450-459.

Heaton, T. H. (1985). A model for a seismic computerized alert network. *Science*, 228(4702), 87-90.

Hoshiba, M., Kamigaichi, O., Saito, M., Tsukada, S., Hamada, N. (2008). Earthquake early warning starts nationwide in Japan. *Eos Trans AGU*, 89(8), 73–80.

Iervolino, I. (2011). Performance-based earthquake early warning. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2), 209-222.

Isacks, B., Oliver, J., Sykes, L. (1968). Seismology and Global Tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 73(18), 5855-5899.

Japan Meteorological Agency. (2007). *Earthquake Early Warning System*. Recuperado de: <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew.html>

Japan Meteorological Agency. (s/f). Summary of Tables explaining the JMA Seismic Intensity Scale. Monitoring of Earthquakes, Tsunamis and Volcanic Activity. Recuperado de <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/earthquake.html>.

Jinghai, X., Xiaozhe, Y., Dingchao, C., Jiwen, A., Gaozong, N. (2016). Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 51-62.

Kanamori, H. (2005). Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Earth Planet Science*, 33, 195-214.

Kuroiwa, J. (2014). Peru sustainable (resilient) cities programme 1998-20212. Its application 2014-2021. *Procedia Economics and Finance*, 18, 408-415.

Mac-Guirre, R. K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute. Oakland, California.

Muñoz, D. (1989). *Conceptos Básicos en Riesgo Sísmico*. Física de la Tierra, 1, 199-215.

Murray, A., Tong, D., Kamyoun, K. (2010). Enhancing classic coverage location models. *International Regional Science Review*, 33(2), 115-133.

Nakamura, Y., Saita, J. (2007). UrEDAS, the Earthquake Warning System: Today and Tomorrow. *Earthquake Early Warning Systems*. (pp. 249-281). Berlin: Springer.

Ortega, C. (2014). *Determinación de la vulnerabilidad estructural de edificaciones por efecto de sismo en el centro urbano del distrito de Villa Rica* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Owen, S. H., Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, 111(3), 423-447.

Pollock, S., Maltz, M. (1994). Operations Research in the Public Sector: An introduction and Brief History. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 6, 1-22.

Sagripanti, G., Bettiol, A., Seitz, C. (2007) *Terremotos: nuestro planeta vibra bajo el poder de su energía*. Programa de Divulgación Científica para la Enseñanza de las Ciencias – CORBOBENSIS. Agencia Córdoba Ciencia, Córdoba, Argentina.

Sauter, F. (1989). *Fundamentos de ingeniería Sísmica I: Introducción a la Sismología*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Sitharam, T. G., Kolathayar, S. (2018). *Preparing for Earthquakes: Lessons for India*. Springer International Publishing.

Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones*. Pearson Education.

Tavera, H. (2014). *Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú*. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Tavera, H., Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la Tierra*, 1998.

Tarbuck, E., Lutgens, F., Tasa, K. (1999). *Ciencias de la Tierra*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.

Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., Lawrence, B. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363–1373.

United States Geological Survey (USGS). (2014). *U.S. Geological Survey*. Recuperado de <https://www.usgs.gov/>

Wu, Y-M., Kanamori, H. (2005). Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P-waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), 1181-1185.

Yang, S. (2017). *Improving the performance of Service Network through Location-based Optimization and Analysis of - a case study on postal service in a city in Northern Norway* (Tesis de Maestría). Norges Arktise Universitet, Gjøvik, Norway.

Zollo, A., Iannaccone, G., Convertito, V., Elia, L., Iervolino, I., Lancieri, M., ...Gasparini, P. (2009). Earthquake Early Warning System in Southern Italy. *Eyclopedia of Complexity and System Science: Complexity in earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes, and Forecast* (pp. 2395-2421). New York, EE. UU.: Springer.

