

## 4. Características del movimiento sísmico

IVÁN FRANCISCO HUERGO RÍOS\*

HUGO HERNÁNDEZ BARRIOS\*\*

JUAN GERARDO ALCÁNTAR SÁNCHEZ\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.266.04>

### Resumen

El 19 de septiembre de 2022, en el Estado de Michoacán ocurrió un sismo de subducción con magnitud de momento de 7.6 a 37 km al suroeste del municipio de Aquila, Michoacán, el cual ocasionó daños estructurales y personas lesionadas en ciudades localizadas en la costa del Pacífico mexicano. Se calcularon los parámetros de los registros de las aceleraciones sísmicas proporcionadas por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), obtenidas en las estaciones ubicadas en las localidades de Maruata, Tancítaro y Morelia; entre los cuales destacan la aceleración máxima del suelo (PGA), la intensidad espectral de Housner (IH), la intensidad de Arias, potencial destructivo (PD), velocidad absoluta acumulada (CAV) e intensidad de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA).

**Palabras clave:** *sismo del 19 septiembre de 2022, intensidad de Arias, aceleración máxima del suelo, intensidad de Housner, potencial destructivo, velocidad absoluta acumulada, intensidad de la Agencia Meteorológica de Japón.*

---

\* Doctor en Ingeniería. Profesor de tiempo completo en la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Monterrey, Nuevo León, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9122-4832>; ID'Scopus: 57210997993; Correo: [ivan.huergo@udem.edu](mailto:ivan.huergo@udem.edu)

\*\* Doctor en Ingeniería. Profesor-investigador titular C de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8515-5965>

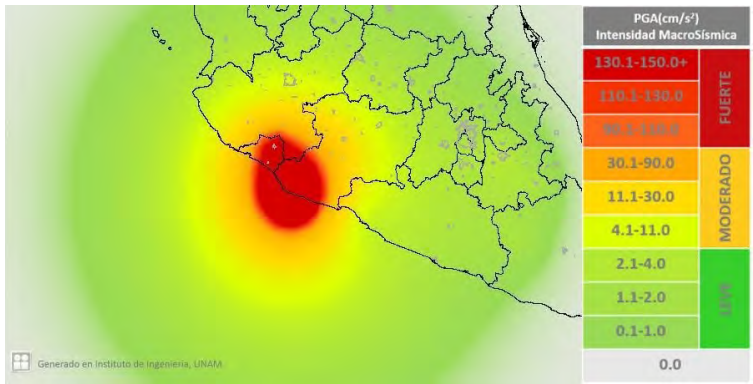
\*\*\* Maestro en Ingeniería. Profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9349-5684>

# Introducción

El día 19 de septiembre del año 2022, a las 13:05 h ocurrió un evento sísmico en las costas del Pacífico mexicano, muy cercano a los municipios de Aquila y Coalcomán en el estado de Michoacán, México. Este fenómeno tuvo lugar en la zona llamada de subducción, entre la placa tectónica de Cocos y la placa Continental Norteamericana. El Servicio Sismológico Nacional, ssn, reportó que el sismo tuvo una magnitud de 7.7 Mw con epicentro en las coordenadas 18.22° latitud Norte y -103.29° longitud Oeste, el hipocentro se ubicó a una profundidad de 15 km y según la información desplegada por el ssn (<http://www.ssn.unam.mx>) hasta las 20:00 h del 31 de diciembre de 2022, se registraron 13 140 réplicas del sismo, siendo la más grande de 6.9 Mw.

En la figura 4.1, se muestra el mapa de intensidades del sismo del 19 de septiembre del año 2022, el cual fue publicado en el reporte especial del Servicio Sismológico Nacional (ssn, 2022). Como se puede observar las intensidades mayores se presentaron en los estados de Colima y Michoacán, en donde se estimaron intensidades entre 130 y 150 cm/s<sup>2</sup>.

Figura 4.1. Mapa de aceleraciones máximas del suelo: sismo del 19 de septiembre de 2022

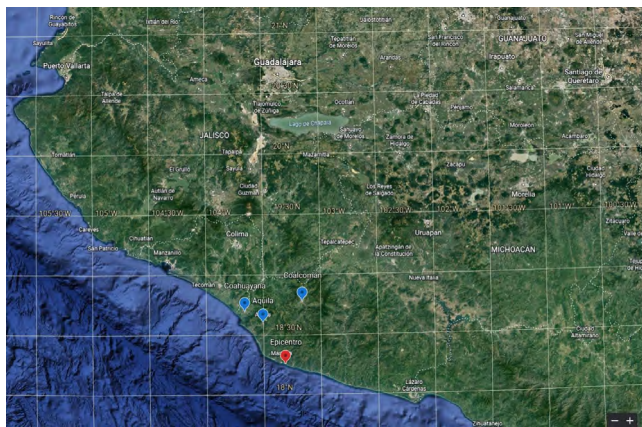


Fuente: SSN (2022).

El sismo del 19 de septiembre de 2022, dejó una gran cantidad de estructuras dañadas en diversas comunidades de Michoacán, pero principal-

mente en las comunidades que forman la Sierra-Costa. Un equipo conformado por profesores y estudiantes del posgrado y de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), realizaron la inspección y evaluación de los daños estructurales en diversas comunidades, en particular en los municipios de Aguila, Coahuayana y Coalcomán, cuyas cabeceras municipales se encuentran a una distancia entre 42 y 65 km del epicentro, como se observa en la figura 4.2.

Figura 4.2. Localización del epicentro y de las comunidades de Michoacán con mayor daño



Fuente: elaboración propia.

Se reportaron daños en casas, escuelas, en los municipios más afectados clínicas, hospitales, hoteles, iglesias, oficinas administrativas y comercios. En varios lugares se interrumpieron las actividades económicas, comerciales y administrativas, pero, sobre todo, debe resaltarse el hecho de que algunos centros de salud y un gran número de escuelas suspendieron sus actividades por más de dos semanas después de lo ocurrido.

Según el comunicado emitido el 19 de septiembre del 2022 por la Secretaría de Seguridad y Protección ciudadana, el evento sísmico fue percibido por aproximadamente 48 millones de personas. El comité nacional de emergencias se declaró en sesión permanente para monitorear la actividad sísmica en la región y concluir la evaluación de daños. También se informó que no se esperaba incremento significativo en el nivel del mar. En lo que respecta a la información de la Comisión Federal de Electricidad, se repor-

taron 2 millones de usuarios afectados en el servicio eléctrico, aunque el 90% se restableció antes de las 15:00 horas.

Se reportaron una gran cantidad de estructuras afectadas en Michoacán y Colima, pero los daños se extendieron a los estados vecinos de Jalisco, Aguascalientes, Nayarit, Estado de México, incluyendo a la ciudad de México, localizada a más de 425 km de distancia del epicentro, pero con daños mínimos. Las afectaciones se produjeron en la infraestructura urbana, puentes, carreteras y deslizamientos de tierra que interrumpieron el tránsito en carreteras cercanas al epicentro en el estado de Michoacán.

## Demanda sísmica

De acuerdo con el reporte preliminar elaborado por un equipo del Earthquake Engineering Research Institute (EERI) y de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS) (Miranda *et al.*, 2022), la aceleración máxima del terreno (PGA) —registrada en la estación COMA, localizada en la comunidad de Comala, Colima, a 132 km del epicentro y a 55 km del plano de falla— fue de  $207 \text{ cm/s}^2$ . En cuanto a la aceleración espectral Samax, el valor pico fue de  $682 \text{ cm/s}^2$  para un periodo de 0.32 s (Miranda *et al.*, 2022, tabla 3.1). En la figura 4.3 se observa la localización de las estaciones más cercanas al epicentro, operadas por el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geofísica, ambos de la UNAM (Miranda *et al.*, 2022).

Figura 4.3. Localización de las estaciones sísmicas más cercanas al epicentro



Fuente: recuperada de Miranda *et al.* (2022).

La tabla 4.1 muestra los valores de aceleración de diseño que especifica el *Manual de diseño de obras civiles: Diseño por sismo* (CFE, 2015), para la comunidad de Aquila, que es el lugar en el que se reportaron la mayor cantidad de daños estructurales. Se presentan los valores de aceleración de diseño para periodo cero (aceleración del terreno) y los valores de aceleración máximos del espectro elástico, tanto para estructuras del grupo B, que corresponde a estructuras de importancia normal, como son oficinas, comercios, viviendas, entre otras, y para estructuras clasificadas como del grupo A, que corresponden a las de mayor importancia social y económica, como son escuelas, clínicas, hospitales e iglesias, etcétera.

Tabla 4.1. *Aceleraciones de diseño del MDOC (2015) para Aquila, Michoacán*

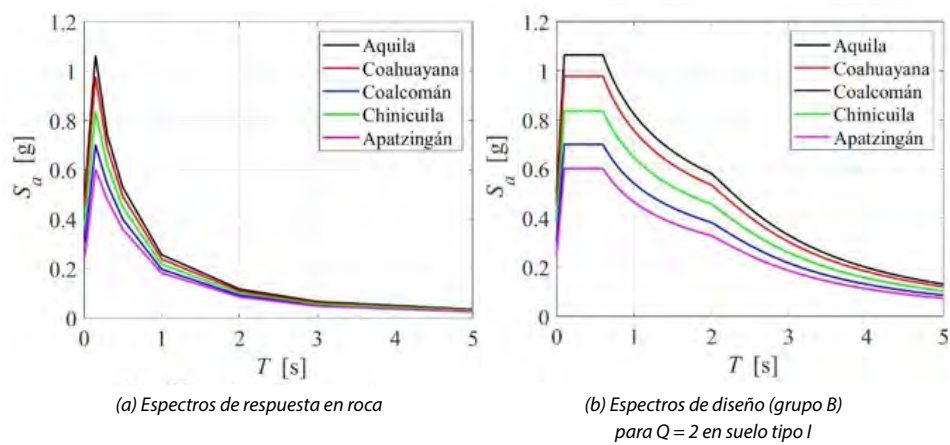
| Aceleración en roca (cm/s <sup>2</sup> ) |         | Aceleración máxima de diseño (cm/s <sup>2</sup> ) |         |
|------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------|---------|
| Grupo B                                  | Grupo A | Grupo B                                           | Grupo A |
| 500                                      | 750     | 1 044                                             | 1 566   |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4.3 se muestran los espectros de respuesta y de Diseño, realizados utilizando las recomendaciones del Manual (CFE, 2015) para los municipios de Aquila, Coahuayana, Coalcomán, Chinicuila y Apatzingán. Para la realización de los espectros se consideró un terreno rocoso, suelo tipo I y un factor de comportamiento sísmico  $Q = 2$ , para estructuras del grupo B.

Dadas las características de las estructuras existentes en las comunidades afectadas de la Sierra-Costa de Michoacán, se estima que tienen periodos de vibrar Cortos, del orden de 0.1 a 0.2 s. Se considera que un periodo de 0.15 s, de la figura 4.4, para las estructuras del grupo B, se esperan aceleraciones del orden de 1 044 cm/s<sup>2</sup> para Aquila, 959 cm/s<sup>2</sup>; Coahuayana, 820 cm/s<sup>2</sup>; Chinicuila; 687 cm/s<sup>2</sup>; Coalcomán, y de 591 cm/s<sup>2</sup> para Apatzingán.

Figura 4.4. Espectros de respuesta y diseño obtenidos según el Manual de Obras Civiles



Fuente: recuperado de CFE (2015).

Intensidad del movimiento

En la página electrónica del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) se muestra el mapa de Intensidades sísmicas del movimiento sísmico M 7.6-35 km de Aquila, México. Las estaciones sísmicas ubicadas en Michoacán y reportadas en dicha referencia, se resumen en la tabla 4.2. En la tabla 4.2 se indica la denominación de la estación sísmica, las coordenadas utm y la intensidad sísmica reportada en el sitio.

Tabla 4.2. Estaciones sísmicas en Michoacán y valor de la Intensidades sísmicas reportadas en USGS, Geological Survey

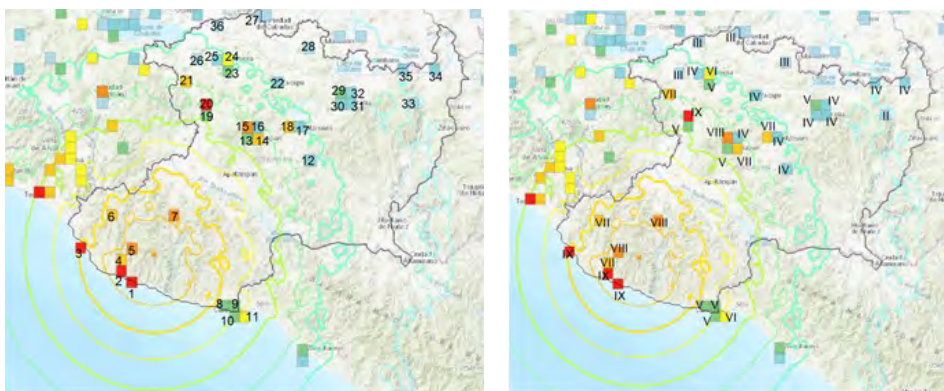
| No | Estación   | UTM               | I    | No | Estación                   | UTM              | I   |
|----|------------|-------------------|------|----|----------------------------|------------------|-----|
| 1  | Coalcomán  | 13Q 069 201 10000 | IX   | 19 | Santa Clara de Valladares  | 13Q 076 216 1000 | V   |
| 2  | Coahuayana | 13Q 068 202 10000 | IX   | 20 | Santa Clara de Valladares* | 13Q 076 217 1000 | IX  |
| 3  | Coahuayana | 13Q 064 204 10000 | IX   | 21 | Cotija                     | 13Q 074 219 1000 | VII |
| 4  | Coalcomán  | 13Q 068 203 1000  | VII  | 22 | Zacapu                     | 14Q 020 219 1000 | IV  |
| 5  | Coalcomán  | 13Q 069 204 1000  | VIII | 23 | Jacona                     | 13Q 078 220 1000 | V   |
| 6  | Coalcomán  | 13Q 067 207 1000  | VII  | 24 | Zamora                     | 13Q 078 221 1000 | VI  |
| 7  | Aguililla  | 13Q 073 207 1000  | VIII | 25 | Ario                       | 13Q 077 221 1000 | IV  |

|    |                       |                  |      |    |                              |                  |     |
|----|-----------------------|------------------|------|----|------------------------------|------------------|-----|
| 8  | Las Guacamayas        | 13Q 078 199 1000 | V    | 26 | Rincón de San Nicolás Romero | 13Q 075 221 1000 | III |
| 9  | Las Guacamayas        | 13Q 079 199 1000 | V    | 27 | La Piedad                    | 13Q 081 225 1000 | III |
| 10 | Lázaro Cárdenas       | 13Q 079 198 1000 | V    | 28 | Puruándiro                   | 14Q 023 222 1000 | III |
| 11 | Lázaro Cárdenas       | 13Q 080 198 1000 | VI   | 29 | Morelia                      | 14Q 026 218 1000 | V   |
| 12 | Tacámbaro             | 14Q 023 212 1000 | IV   | 30 | Morelia                      | 14Q 026 217 1000 | IV  |
| 13 | Uruapan               | 13Q 080 214 1000 | V    | 31 | Morelia                      | 14Q 027 217 1000 | IV  |
| 14 | Uruapan               | 13Q 081 214 1000 | VII  | 32 | Morelia                      | 14Q 027 218 1000 | IV  |
| 15 | Uruapan               | 13Q 080 215 1000 | VIII | 33 | Hidalgo                      | 14Q 033 217 1000 | II  |
| 16 | Uruapan               | 13Q 081 215 1000 | IV   | 34 | Tungareo                     | 14Q 035 220 1000 | IV  |
| 17 | Pátzcuaro             | 14Q 022 215 1000 | IV   | 35 | Zinapécuaro                  | 14Q 032 220 1000 | IV  |
| 18 | Santa Clara del Cobre | 14Q 021 215 1000 | VII  | 36 | Tanguato                     | 13Q 077 224 1000 | III |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4.4a se muestra el mapa del estado de Michoacán con la ubicación numerada de cada estación según la tabla 4.1. En la figura 4.5b se muestra la intensidad sísmica en cada estación de la tabla 4.1.

Figura 4.5. Ubicación de las estaciones sísmicas ubicadas en Michoacán y la intensidad sísmica del evento del 19 de septiembre de 2022



Fuente: adaptada de la USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000i9bw/dyfi/intensity>).

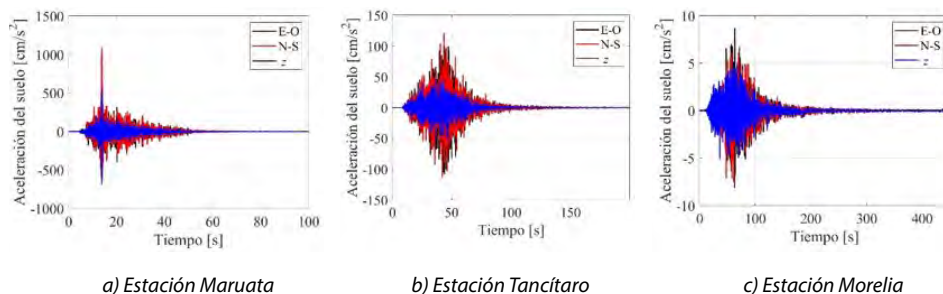
En la figura 4.4 se puede ver que las comunidades ubicadas en la costa de Michoacán tuvieron una intensidad sísmica de IX (estaciones

números 1, 2 y 3), es raro que la estación 20, ubicada en la comunidad de Santa Clara de Valladares, también tenga una similar. Por otro lado, como se espera, para comunidades alejadas del epicentro las intensidades sísmicas disminuyen. Se presentó una Intensidad sísmica de IV-V, para las estaciones ubicadas en Morelia (estaciones 29, 30, 31 y 32), capital del estado.

## Parámetros sísmicos

El Servicio Sismológico Nacional, adscrito al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México opera exitosamente una red de banda ancha distribuida en toda la República Mexicana para el monitoreo continuo de los eventos sísmicos que se registran en el país. El SSN, proporcionó los registros de aceleraciones obtenidos el 19 de septiembre en tres estaciones ubicadas en el Estado de Michoacán: (1) estación MMIC, ubicada en la comunidad de Maruata municipio de Aquila, latitud  $18.288528^\circ$ , longitud  $-103.345565^\circ$ , esta estación está próxima al sitio en el que se reportó el epicentro del evento sísmico; (2) estación TMIG, localizada en Tancítaro, latitud  $19.348953^\circ$ , longitud  $-102.311172^\circ$ , y (3) estación MOIG, localizada en la ciudad de Morelia (latitud  $19.646812^\circ$ , longitud  $-101.2271135^\circ$ ) en las instalaciones de la UNAM campus Morelia. Se muestran los registros de aceleraciones de las tres estaciones antes descritas en la figura 4.6.

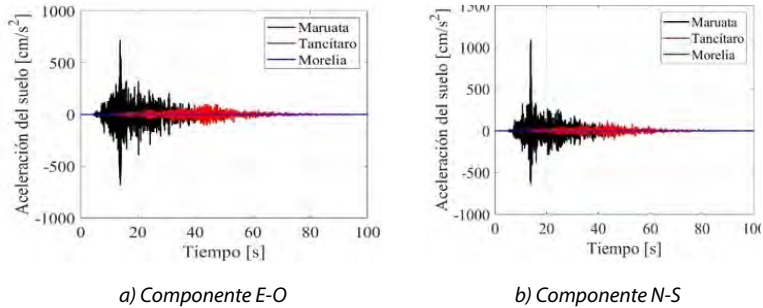
Figura 4.6. Registros sísmicos de estudio: 19 de septiembre de 2022



Fuente: elaboración propia.

En la figura 4.7 se muestran los registros de aceleraciones para las componentes horizontales E-O y N-S, de los tres obtenidos en las estaciones de Maruata, Tancítaro y Morelia.

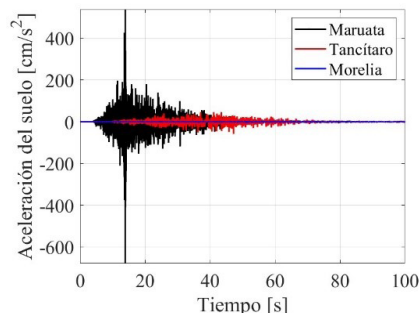
Figura 4.7. Registros sísmicos horizontales en las estaciones Maruata, Tancítaro y Morelia



Fuente: elaboración propia.

Se puede ver la diferencia de aceleraciones del terreno en las tres estaciones sísmicas de estudio en la figuras 4.6. La mayor aceleración del terreno se obtiene en la estación Maruata, siendo mayor en la dirección de la componente N-S. Para el caso de la estación Morelia, las aceleraciones del terreno son muy pequeñas, en ambas direcciones. La figura 4.8 muestra el componente vertical de las tres estaciones sísmicas estudiadas, se observa ver la gran diferencia de aceleraciones en la estación, que se encuentra próxima a la zona epicentral en relación con las otras dos, incluso es la más pequeña.

Figura 4.8. Comparación de los registros sísmicos verticales de las estaciones Maruata, Tancítaro y Morelia



Fuente: elaboración propia.

Para fines de identificar la variación de las aceleraciones en las tres estaciones sísmicas estudiadas, en la figura 4.9 se muestra su ubicación y los registros de aceleraciones horizontales en cada una de las estaciones.

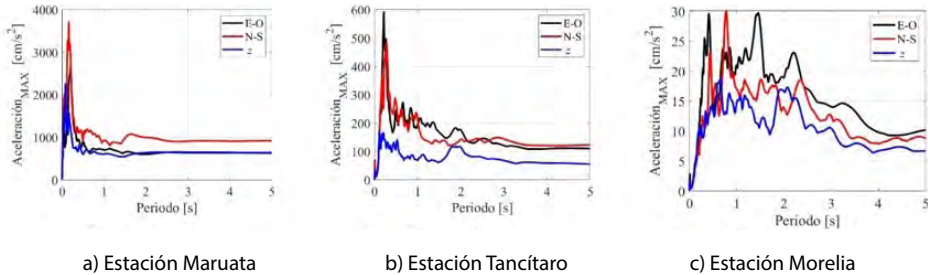
Figura 4.9. Ubicación de las estaciones sísmicas y sus registros de aceleraciones horizontales



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los espectros de respuesta de aceleraciones para las tres estaciones antes descritas y para un amortiguamiento estructural de 5% en la figura 4.10.

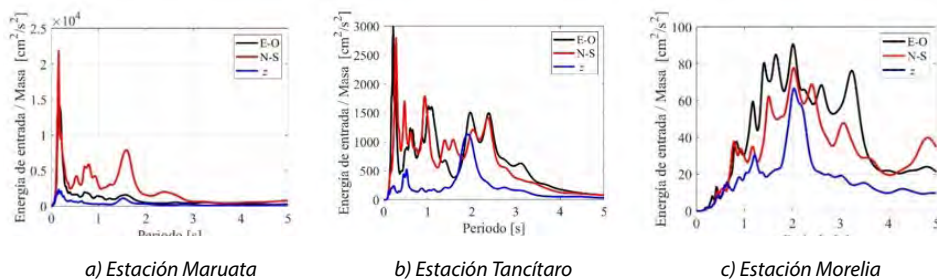
Figura 4.10. Espectros de respuesta de aceleraciones relativas para un amortiguamiento de 5 %



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los espectros elásticos de energía de entrada para un amortiguamiento de 5% en la figura 4.11, para los registros sísmicos de las estaciones Maruata, Tancítaro y Morelia.

Figura 4.11. Espectros elásticos de energía de entrada para un amortiguamiento de 5%



Fuente: elaboración propia.

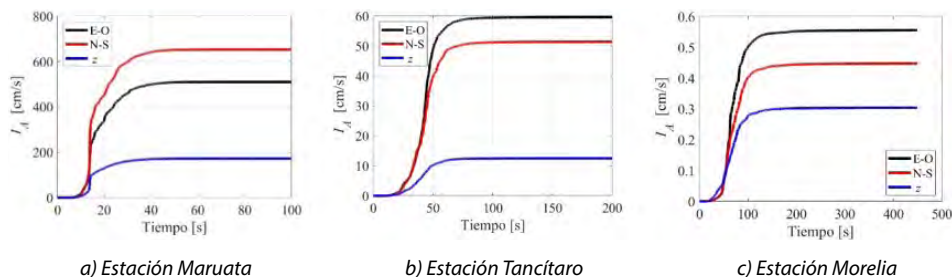
En la ingeniería estructural es de vital importancia caracterizar los sismos con el objetivo de poder realizar estudios de peligro sísmico para el correcto diseño de estructuras, ya que es necesario definir una serie de parámetros que proporcionen un indicio del daño que puede causar un sismo en una determinada localidad; entre ellos se puede mencionar la aceleración máxima del suelo (PGA), la intensidad espectral de Housner (IH), el potencial destructivo (PD), la velocidad absoluta acumulada (CAV), la intensidad de la JMA, etcétera.

La intensidad de Arias (1970), en honor al científico chileno Arturo Arias Suárez, es un parámetro que refleja la energía total contenida en el registro de aceleraciones y se relaciona con la capacidad que tiene el sismo de producir daño estructural. La intensidad de Arias ( $I_A$ ) está dada por:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_0}^{t_0 + D} a(t)^2 dt \quad (4.1)$$

donde  $I_A$  es la intensidad de Arias,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $t_0$  es el tiempo inicial del registro de aceleraciones,  $D$  es la duración del registro de aceleraciones y  $a(t)$  es la aceleración del suelo del registro sísmico. Para los tres registros sísmicos estudiados, las intensidades de Arias se muestran en la figura 4.12.

Figura 4.12. Intensidades de Arias, registros sísmicos 19 septiembre de 2022



Fuente: elaboración propia.

El potencial destructivo definido por Araya y Saragoni (1984), es un parámetro que permite evaluar la capacidad destructiva de un evento sísmico, es decir, mediante este parámetro es posible distinguir entre un sismo que realmente es capaz de producir daño y otro que no lo es, para distintos lugares del mundo (Jorquera, 2014). El potencial destructivo (PD) está dado por:

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad (4.2)$$

donde  $I_A$  es la intensidad de Arias y  $v_0$  es la intensidad de cruces por cero; ésta última es calculada del registro de aceleraciones del suelo contabilizando la cantidad total de cruces por cero dividido por el tiempo total transcurrido (Jorquera, 2014).

Otro parámetro sísmico que en ocasiones puede resultar de interés es la intensidad de Housner (1952), la cual mide la severidad de un movimiento en estructuras elásticas. La intensidad de Housner (IH) está definida por el área bajo la curva del espectro de respuesta de velocidades y está dada por:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi = 0.2) dt \quad (4.3)$$

$S_v$  es el espectro de respuesta elástico de velocidades relativas para un amortiguamiento  $\xi = 0.2$  (para suavizar el espectro), el cual se integra para periodos ( $T$ ) desde 0.1 s hasta 2.5 s (valores que incluyen el rango de periodos comunes en el diseño de estructuras). Cabe mencionar que este parámetro sísmico suele no utilizarse en estructuras flexibles con bajo amortiguamiento.

Por otra parte, la velocidad absoluta acumulada (CAV) fue definida por el Electrical Power Research Institute (EPRI, 1991). Este parámetro sísmico se define como el área bajo la curva del acelerograma absoluto, es decir, considera la contribución de la amplitud y la duración del movimiento y está dado por:

$$CAV = \int_{t_0}^{t_0 + D} a(t) dt \quad (4.4)$$

$a(t)$  es el registro de aceleraciones, y donde  $t_0$  y  $D$  son el tiempo inicial y la duración total del registro sísmico, respectivamente.

Para caracterizar los sismos se suelen utilizar dos escalas: la de Richter; que representa la energía sísmica, y la de Mercalli, que se basa en el efecto o daño producido en las estructuras y en la sensación percibida por la gente. Sin embargo, existe otra escala desarrollada por la JMA, la cual fue creada como una estimación del daño estructural producido por un movimiento sísmico, determinado de manera subjetiva mediante una escala de 1 a 7 cuya unidad de medida es el *Shindo* (intensidad del terremoto/grado de agitación en japonés).

Mientras la escala de Richter mide la energía liberada por un sismo en su epicentro, la escala JMA mide, de 0 a 7, el grado de agitación en un punto de la superficie terrestre y el efecto que deja sentir en ese punto. En la tabla 4.3 muestra de manera descriptiva los diferentes grados de intensidad sísmica asociados a la escala JMA,  $I_{JMA}$ , los cuales están basados en el sitio web de la Agencia Japonesa.

Tabla 4.3. Escala de intensidad sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón.

| Intensidad sísmica $I_{JMA}$ [Shindo]                                                                                                                  |                                                                                                       |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0                                                                                                                                                      | 1                                                                                                     | 2                                                                                                                                                                                         | 3                                                                                                                                                                                         | 4                                                                                                                                                                                          |
|                                                                       |                      |                                                                                                          |                                                                                                          |                                                                                                          |
| Sismo imperceptible para los humanos                                                                                                                   | Solo algunas personas en el edificio perciben el temblor                                              | La mayoría de las personas en el edificio perciben el temblor. Los objetos colgantes como lámparas oscilan ligeramente                                                                    | Casi todas las personas en el edificio perciben el temblor. Los platos en el armario de la cocina pueden sonar por la sacudida                                                            | Casi todas las personas se asustan. Los objetos colgantes tales como lámparas oscilan violentamente y los adornos inestables pueden caer                                                   |
| Intensidad sísmica $I_{JMA}$ [Shindo]                                                                                                                  |                                                                                                       |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                            |
| 5-                                                                                                                                                     | 5+                                                                                                    | 6-                                                                                                                                                                                        | 6+                                                                                                                                                                                        | 7                                                                                                                                                                                          |
|                                                                       |                      | <br><small>Alta resistencia contra terremoto</small><br><small>Baja resistencia contra terremoto</small> | <br><small>Alta resistencia contra terremoto</small><br><small>Baja resistencia contra terremoto</small> | <br><small>Alta resistencia contra terremoto</small><br><small>Baja resistencia contra terremoto</small> |
| La mayoría de las personas sienten temor y tratan de apoyarse en algo. Los platos en el armario de la cocina y los libros en los estantes pueden caer. | La mayoría de las personas encuentran dificultad para moverse. Algunos muebles no fijados pueden caer | Es difícil mantenerse en pie. En muchos casos es imposible abrir la puerta. Los azulejos en paredes y vidrios de ventanas pueden quebrarse y caerse                                       | Imposible mantenerse en pie y moverse a voluntad debido a la sacudida. Casi todos los muebles no fijados se desplazan y algunos caen                                                      | Casi todos los muebles no fijados se desplazan y caen, y también algunos pueden ser lanzados por el aire debido al movimiento                                                              |

Fuente: adaptada de JMA y USGS (2022)

Para calcular la intensidad JMA,  $I_{JMA}$ , se aplica la transformada de Fourier para las tres componentes de aceleración del registro (Jorquera, 2014). Luego, se aplica un filtro pasa-banda en el dominio de las frecuencias. Este filtro está determinado por (Karim y Yamazaki, 2001):

$$F(f) = F_1(f) F_2(f) F_3(f) \quad (4.5)$$

donde

$$F_1(f) = \sqrt{1/f} \quad (4.6)$$

$$F_2(f) = \frac{1}{\sqrt{1+0.649x^2+0.241x^2+0.0557x^6+0.009664x^8+0.00134x^{10}+0.000155x^{12}}} \quad (4.7)$$

$$x = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (4.8)$$

$$F_3(f) = \sqrt{1 - e^{\left(\frac{f}{f_c}\right)}} \quad (4.9)$$

$F_2(f)$  el filtro pasa-bajo;  $F_3(f)$ , el filtro pasa-alto;  $f$ , la frecuencia en Hz;  $f_c$ , la frecuencia pasa-bajo; y  $f_0$ , la frecuencia pasa-alto. Finalmente, la intensidad sísmica JMA está dada por (Jorquera, 2014):

$$I_{JMA} = 2 \log_{10} (a_0) + 0.94 \quad (4.10)$$

$a_0$  es una aceleración característica resultante de sumar vectorialmente los tres componentes de aceleración. Dicha aceleración característica debe cumplir que  $\tau(a_0) \geq 0.3$  s, donde  $\tau(a)$  es el total de tiempo, el cual excede la aceleración  $a$ .

Con base en las definiciones anteriores, los parámetros sísmicos calculados para las 3 componentes de los registros sísmicos en las 3 estaciones de interés se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. *Parámetros sísmicos para el evento del 19 de septiembre de 2022 en Michoacán*

| Parámetro<br>E-O          | Estación Maruata |          |          | Estación Tancítaro |        |        | Estación Morelia |        |        |
|---------------------------|------------------|----------|----------|--------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|                           | N-S              | z        | E-O      | N-S                | z      | E-O    | N-S              | z      |        |
| [cm/s <sup>2</sup> ]      | 719.27           | 1 094.80 | 678.95   | 108.30             | 121.55 | 58.08  | 8.73             | 7.55   | 5.10   |
| PGA [g]                   | 0.7332           | 1.1160   | 0.6921   | 0.1104             | 0.1239 | 0.0592 | 0.0089           | 0.0077 | 0.0052 |
| [%g]                      | 73.32            | 111.60   | 69.21    | 11.04              | 12.40  | 5.92   | 0.89             | 0.77   | 0.52   |
| I <sub>A</sub> [cm/s]     | 509.83           | 652.62   | 172.04   | 59.55              | 51.34  | 12.47  | 0.5552           | 0.4472 | 0.3038 |
| I <sub>H</sub> [cm]       | 53.23            | 83.62    | 35.84    | 25.67              | 26.91  | 15.21  | 4.90             | 3.54   | 2.77   |
| I <sub>JMA</sub> [Shindo] | 4.87             | 4.87     | 4.87     | 3.87               | 3.87   | 3.87   | 2.09             | 2.09   | 2.09   |
| v <sub>0</sub> [1/s]      | 14.52            | 14.28    | 16.93    | 6.72               | 7.36   | 7.68   | 21.54            | 20.70  | 21.88  |
| CAV [cm/s]                | 2 421.47         | 2 657.48 | 1 282.12 | 959.26             | 876.12 | 328.95 | 0                | 0      | 0      |
| PD [cm s]                 | 2.42             | 3.20     | 0.60     | 1.32               | 0.95   | 0.21   | 0.0012           | 0.0010 | 0.0006 |

Fuente: elaboración propia.

De la tabla 4.4 se puede ver que la aceleración máxima que se presentó durante el sismo del 19 de septiembre en la estación de Maruata es de 1 094.80 cm/s<sup>2</sup> en componente N-S, en Tancítaro de 121.55 cm/s<sup>2</sup> y en Morelia de 8.73 cm/s<sup>2</sup>.

Con base en la escala de intensidad sísmica JMA, el sismo en Morelia probablemente fue percibido por la población ( $I_{JMA} = 2$  Shindo) pero sin generar problemas estructurales; caso contrario para las comunidades de Maruata y Tancítaro donde el valor de  $I_{JMA}$  varía aproximadamente entre 4 y 5 shindo. Lo anterior también se corrobora revisando la intensidad de Arias (IA) y potencial de daño (PD) en las tres estaciones, donde claramente dichos valores en Maruata y Tancítaro resultaron ser cientos de veces mayores que los de Morelia.

En Miranda *et al.* (2022) se reporta que la aceleración máxima del terreno, PGA, registrada en la estación COMA, localizada en la comunidad de Comala, Colima, fue de 207 cm/s<sup>2</sup>, lo cual no es representativo para el estado de Michoacán en las zonas cercanas al sitio donde fue el epicentro.

En la tabla 4.5 se muestran los parámetros que determinan la Intensidad sísmica en un sitio después de evento sísmico (Giles, 2016).

Tabla 4.5. *Escala de Intensidad de Mercalli*

| Movimiento | No percibido                                                                      | Débil                                                                             | Ligero                                                                            | Moderado                                                                          | Fuerte                                                                            | Muy fuerte                                                                        | Severo                                                                            | Violento                                                                          | Extremo                                                                             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Daño       | Ninguno                                                                           | Ninguno                                                                           | Ninguno                                                                           | Muy ligero                                                                        | Ligero                                                                            | Moderado                                                                          | Moderado/severo                                                                   | Severo                                                                            | Muy severo                                                                          |
| PGA (%g)   | < 0.0464                                                                          | 0.297                                                                             | 2.76                                                                              | 6.2                                                                               | 11.50                                                                             | 21.50                                                                             | 40.10                                                                             | 74.7                                                                              | > 139                                                                               |
| PGV (cm/s) | < 0.0215                                                                          | 0.135                                                                             | 1.41                                                                              | 4.65                                                                              | 9.64                                                                              | 20.0                                                                              | 41.4                                                                              | 85.8                                                                              | > 178                                                                               |
| Intensidad |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Fuente: adaptada de Giles (2016).

Relacionando los valores de las aceleraciones PGA (%g) registrados en la tabla 4.4, para cada estación estudiada, con los valores de la tabla 4.5, se puede determinar la intensidad sísmica en las comunidades en las que se ubican las estaciones sísmicas estudiadas.

Tabla 4.6. *Parámetros asociados a la intensidad sísmica para las estaciones sísmicas estudiadas.*

| Parámetro  | Estación Maruata |          |          | Estación Tancitaro |        |            | Estación Morelia |          |          |
|------------|------------------|----------|----------|--------------------|--------|------------|------------------|----------|----------|
|            | E-O              | N-S      | z        | E-O                | N-S    | z          | E-O              | N-S      | z        |
| PGA [%g]   | 73.32            | 111.60   | 69.21    | 11.04              | 12.40  | 5.92       | 0.89             | 0.77     | 0.52     |
| Movimiento | Violento         | Violento | Violento | Fuerte             | Fuerte | Moderado   | Ligero           | Ligero   | Débil    |
| Daño       | Grave            | Grave    | Grave    | Ligero             | Ligero | Muy Ligero | Sin daño         | Sin daño | Sin daño |
| Intensidad | IX               | IX       | IX       | VI                 | VI     | V          | III-IV           | III-IV   | I-II     |
| CAV [cm/s] | 2421.47          | 2657.48  | 1282.12  | 959.26             | 876.12 | 328.95     | 0                | 0        | 0        |

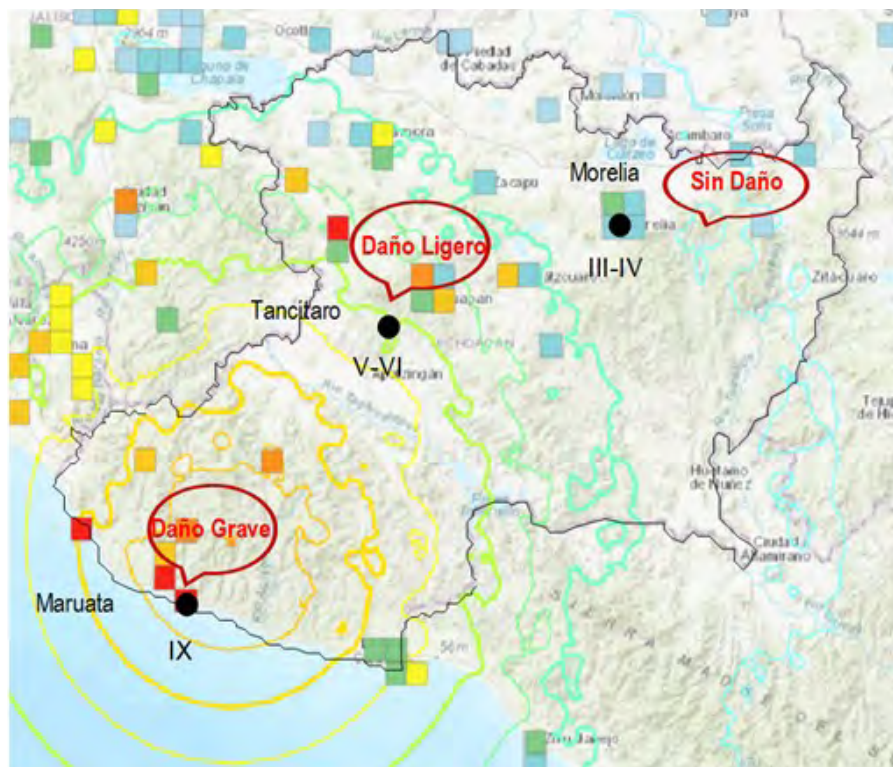
Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4.5 se muestra que en la estación Maruata se presentó una Intensidad de IX, a la que le corresponde daño grave de las estructuras ubicadas en el sitio. En la estación Tancitaro, la Intensidad fue de V-VI, y en la estación Morelia de III-IV, que le corresponde un estado sin daño estructural. Lo anterior es congruente con los daños encontrados durante la evaluación estructural en dichos sitios.

En la figura 4.13 se muestra en forma esquemática la ubicación de las estaciones sísmicas Maruata, Tancitaro y Morelia, en donde también se indica la Intensidad sísmica y el daño asociado a ella. Si se comparan los datos

de la figura 4.12 con los datos de la figura 4.4 adaptada de USGS, se concluye que hay congruencia con los valores obtenidos

Figura 4.13. *Intensidad sísmica en de las estaciones Maruata, Tancitaro y Morelia y el daño asociado a ella*



Fuente: elaboración propia.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Universidad de Monterrey por el apoyo proporcionado y de forma especial a todos los investigadores del Servicio Sismológico Nacional (SSN), en particular al Dr. Víctor Hugo Espíndola Castro, jefe de Análisis e Interpretación de Datos Sísmicos, quienes amablemente proporcionaron la información necesaria para la realización de este trabajo.

## Referencias

- Agencia Meteorológica de Japón (JMA). (s/f). *Información de terremoto: Explicación sobre intensidad sísmica*. JMA. [https://www.data.jma.go.jp/multi/quake/quake\\_advisory.html?lang=es](https://www.data.jma.go.jp/multi/quake/quake_advisory.html?lang=es)
- Araya, R. y Saragoni, G. (1984). Earthquake accelerogram destructiveness potential factor. En *Proceedings of the 8th World Conference of Earthquake Engineering* (pp. 835–842). EERI.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. En R. Hansen (Ed.), *Seismic design for nuclear power plant* (pp. 438–483). MIT.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2015). *Manual de diseño de obras civiles: Diseño por sismo (MDOC)*. CFE / Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Electric Power Research Institute (EPRI). (1991). *Standardization of the cumulative absolute velocity (TR-100082)*. EPRI.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2017). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA.
- Giles, D. (2016). Intensity scales. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of natural hazards* (pp. 544–552) (Encyclopedia of Earth Sciences Series). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_198](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_198)
- Housner, G. (1952). *Intensity of ground motions during strong earthquakes*. California Institute of Technology, Earthquake Research Laboratory.
- Jorquera, R. (2014). *Catálogo de terremotos subductivos chilenos para la generación de curvas de fragilidad* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Karim, K. y Yamazaki, F. (2001). Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 1191–1212.
- Miranda, E., Abucar, V., Alcocer, S., Aldea, S., ... y Velasco, L. (2022). *Aguila, Michoacán, Mexico September 19, 2022, Mw 7.6 Earthquake: Preliminary virtual reconnaissance report*. Design Safe. <https://doi.org/10.17603/ds2-sbcj-nx44>
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). (2022, 19 de septiembre). *M 7.6 - 35 km SSW of Aguililla, Mexico*. USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000i9bw/executive>
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2022). *Sismo del 19 de septiembre de 2022, Michoacán (M 7.7)* (Reporte especial). SSN. [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2022/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20220919\\_Michoacan\\_M74.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2022/SSNMX_rep_esp_20220919_Michoacan_M74.pdf)

