

## APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL ESTADO DE KENTUCKY PARA EVALUAR EL PELIGRO KÁRSTICO EN MÉXICO

MADRIGAL, M. C.; BOTERO, E.;  
OVANDO, E.; OSSA, A. Y OSORIO, L.

El Fondo Nacional para el Turismo, FONATUR, solicitó al Instituto de Ingeniería su participación en el proyecto del Tren Maya, misma que tuvo lugar del 20 de marzo de 2020 al 17 de julio de 2020. El II estuvo involucrado únicamente durante la etapa de Ingeniería Básica de ese proyecto, con el objeto de formalizar la *Colaboración Académica en Materia de Geotecnia y Estructuras durante el desarrollo de la Ingeniería Básica del Tren Maya*. En lo que se refiere a los aspectos relacionados con la geotecnia, desde el inicio del proyecto se reconoció que la kársticidad de la península de Yucatán es el factor que determina los mayores peligros al Tren Maya. Ello resulta de la naturaleza y características de las rocas calizas que prevalecen en toda la península. En cuanto al Tren Maya, al menos 25% del trazo de esta vía se localiza en zonas de alta o muy alta kársticidad.

### Consideraciones generales

La kársticidad se desarrolla a partir de la disolución de rocas sedimentarias solubles como carbonatos, evaporitas y dolomías, principalmente por la acción del agua. El proceso de kársticidad comprende la combinación de diferentes mecanismos y factores entre los cuales se encuentran el factor litológico, el factor estructural y el factor climático (Barea-Luchena, 1995). Posteriormente, se incorporaron dos factores más, la vegetación y el tiempo de exposición de la roca al intemperismo (Bautista *et al.*, 2011). En estas superficies el relieve se caracteriza por la diversidad de formas negativas, como las depresiones tipo dolina y úvala; también de formas positivas, como las lomas y montañas kársticas con tamaños que van desde formas milimétricas, como los lapiaz hasta los poljes de grandes extensiones (Kueny y Day, 2002, Fragoso-Servón *et al.*, 2014). Adicionalmente, el paisaje kárstico se caracteriza por la presencia de poco drenaje superficial debido a la alta permeabilidad y porosidad de las rocas favoreciendo la rápida infiltración del agua y materia orgánica desde la superficie a las cavidades subterráneas (Fragoso-Servón y Pereira, 2014, Mora *et al.*, 2016).

Las dolinas son depresiones cerradas simples circulares o elípticas, mientras que las úvalas tienen forma irregular o alargada; por último, los poljes son depresiones kársticas de gran tamaño, mayores a 1 km<sup>2</sup> (Frelüh, 2003, Ford y Williams, 2007, Fragoso-Servón *et al.*, 2014). Los paisajes kársticos en México representan aproximadamente 15% del territorio nacional. Estos se localizan principalmente en Tamaulipas, Chiapas y la Península de Yucatán; sin embargo, la caracterización de estos territorios tiene aún poco detalle (Espinasa-Pereña, 2007, Mora *et al.*, 2016).

### Evaluación del peligro kárstico

En el estado estadounidense de Kentucky entre 50 y 60 % de su superficie tiene potencial para desarrollarse kársticidad, misma que fue reconocida como amenaza geológica y fue incluida en el Plan de Mitigación de Peligro del Estado desde 2013 (CK-EHMP, 2013). El método incluido en el Plan de Mitigación de Peligro de 2018 para evaluar el peligro por kársticidad, consistió en dividir el estado en recuadros de 1 km<sup>2</sup> y calcular el Índice de Peligro Kárstico (IPK) en cada uno de ellos, a partir de la suma del porcentaje de área kárstica y de la densidad de dolinas:

$$IPK = \log_{10} ((\% \text{ área kárstica}) + (\text{densidad de dolinas}) + 1) \quad (1)$$

Luego, para clasificar los resultados del IPK en las cuatro categorías de peligro establecidas (bajo, medio, alto y severo). En la Tabla 1 se presenta la interpretación de las cuatro categorías de peligro por kársticidad en términos de área kárstica y de la densidad de dolinas.

Tabla 1. Categorías del peligro kárstico en Kentucky (CK-EHMP, 2018).

Categoría de peligro	Definición
Bajo	Área sin desarrollo potencial de karst
Moderado	Área kárstica sin desarrollo de dolinas
Alto	Área kárstica con 1 a 9 dolinas por km <sup>2</sup>
Severo	Área kárstica con más de 9 dolinas por km <sup>2</sup>

## Índice de peligro kárstico en la Península de Yucatán

Para analizar y establecer la aplicabilidad de la metodología del estado de Kentucky, en la península de Yucatán se consideró una malla de análisis de aproximadamente 1 km de ancho sobre el eje del tren compuesta por 3413 recuadros de 1 km<sup>2</sup>.

Para aplicar la metodología y determinar el Índice de Peligro Kárstico para la zona de estudio, se utilizó el programa libre y de código abierto QGIS v 3.10.2. El porcentaje de área kárstica que corresponde a la superficie calcárea por kilómetro cuadrado propensa a presentar disolución, se determinó a partir de la base de datos de los fenómenos naturales y antrópicos que ha integrado el CENAPRED, en el Atlas Nacional de Riesgos de México. En la Tabla 2 se presentan los valores del potencial kárstico definidos para el área de estudio.

Tabla 2. Valores del potencial kárstico definidos para el área de estudio

Valores	Potencial kárstico
0.25	Bajo
0.50	Moderado
0.50	Alto
1.00	Severo

## Resultados

Para cada uno de los recuadros de 1 km<sup>2</sup> de la malla de análisis se determinó el potencial kárstico y la densidad de dolinas

para obtener el Índice de Peligro Kárstico (IPK). Finalmente, para establecer los niveles del peligro correspondientes (bajo, medio, alto y severo), los resultados fueron normalizados dividiendo por el máximo valor obtenido de los análisis y se clasificaron siguiendo la metodología de los Jenks Natural Breaks (Jenks y Caspall, 1971) (Fig. 1). Los resultados obtenidos son producto de los análisis realizados en cada uno de los recuadros de 1 km<sup>2</sup> que conforman la malla de forma independiente. Por lo anterior, no existe una correlación o dependencia entre recuadros contiguos.

En la Tabla 3 se presentan los rangos de cada una de las categorías y la cantidad de recuadros de 1 km<sup>2</sup> de la malla de análisis que pertenecen a cada una de éstas.

Tabla 3. Clasificación del Índice de Peligro Kárstico

Escala de color	Rango	Cantidad de recuadros de 1 km <sup>2</sup>	IPK
	0.0000-0.0864	1797	Bajo
	0.0864-0.2166	779	Moderado
	0.2166-0.4561	579	Alto
	0.4561-1.0000	258	Severo
	Total	3413	

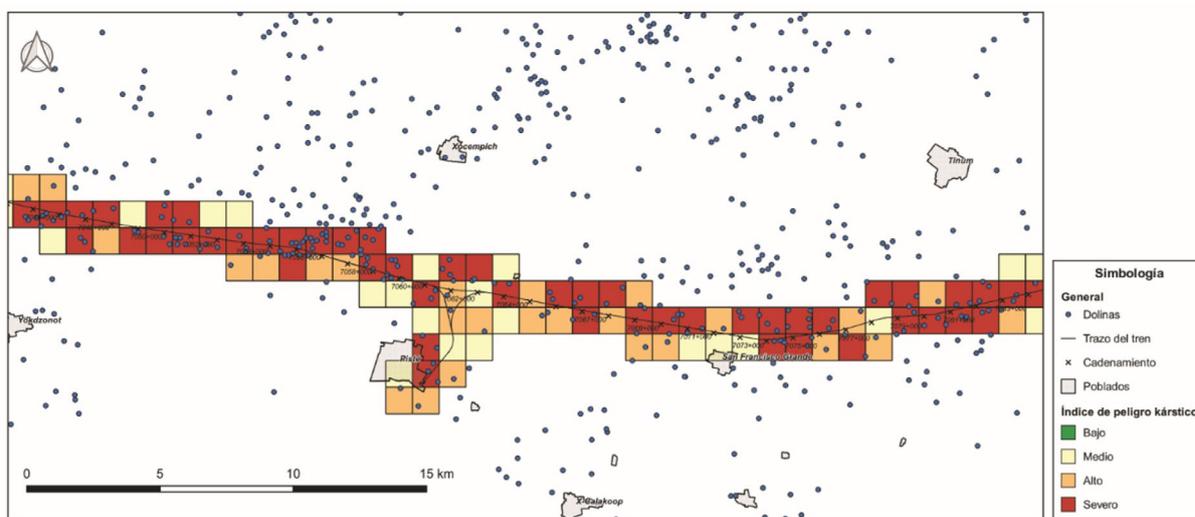


Figura 1. Resultados del Índice de Peligro Kárstico

En la Figura 2 se observa que los recuadros de análisis de 1 km<sup>2</sup> con 25 % de área kárstica sin dolinas tienen un Índice de Peligro Kárstico Bajo. Por otro lado, para los recuadros que tienen entre 50 y 75 % de área kárstica, pero sin dolinas, se tiene un Índice de Peligro Kárstico Medio. A la categoría Alta, pertenecen aquellos recuadros sin dolinas que tienen un área 100 % kárstica; también, aquellos con una dolina y un área kárstica igual o mayor a 50 %; por último, los que tienen una o dos dolinas y un porcentaje de área kárstica igual a 25 %. Finalmente, el Índice de Peligro Kárstico Severo está representado por los recuadros que tienen 25 % del área con potencial kárstico con más de dos dolinas, además, los que tienen 50% o más del área kárstica entre 2 y 12 dolinas.

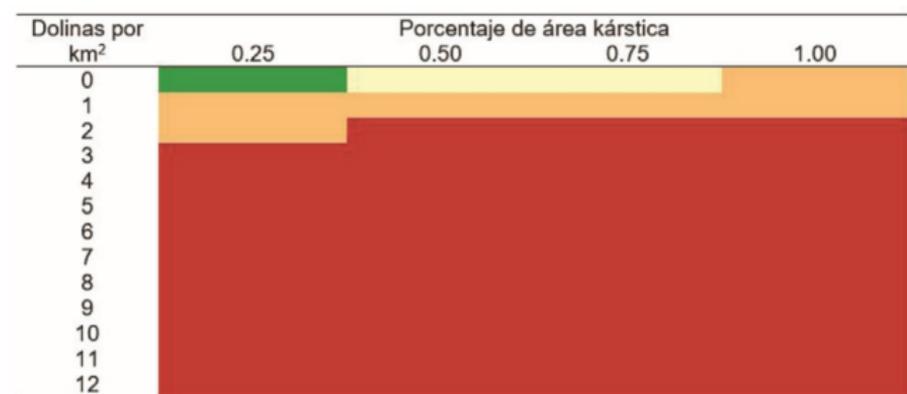


Figura 2. Interpretación del Índice de Peligro Kárstico

## Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante esta metodología no deben ser considerados como la única fuente de información para realizar diseños o propuestas económicas definitivas de un proyecto. Debe aclararse que los resultados dependen fuertemente de la malla de análisis, por ello, los cambios en ella obligan a un nuevo cálculo del Índice de Peligro Kárstico. Los resultados de estos análisis son cualitativos pero permiten orientar trabajos exploratorios de detalle, específicamente, permiten determinar las zonas que requieren mayor exploración geotécnica y geofísica, en función de las características del proyecto. De la misma manera, los análisis aquí presentados permiten orientar otros estudios como los que se relacionan con la mitigación del impacto ambiental.

Los estudios realizados por el Instituto de Ingeniería abarcaron los siete tramos del proyecto, pero no el tramo reubicado recientemente (Cancún a Tulum). Finalmente, la evaluación del peligro kárstico no puede soslayarse para ninguno de los tramos del Tren Maya, de lo contrario, aumentará la probabilidad de que durante la construcción y operación del tren ocurran eventualidades no deseadas e inclusive peligrosas. |

## Referencias

---

- Barea-Luchena, J. (1995). "Geología del Karst desde el punto de vista espeleólogo". *Boletín Espeleológico SECJA*, Vol. 1: 46-52.
- Bautista, F.; Palacio-Aponte, G.; Quintana, P. y Zinck, J. A. (2011). "Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico". *Geomorphology*, Vol. 135: 308-321.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Gobierno de México, febrero 2020: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>.
- Commonwealth of Kentucky Enhanced Hazard Mitigation Plan (CK-EHMP, 2013). Kentucky Emergency Management.
- Commonwealth of Kentucky Enhanced Hazard Mitigation Plan (CK-EHMP, 2018). Kentucky Emergency Management.
- Espinasa-Pereña, R. (2007). "El Karst de México". Mapa NA III 3, en Coll-Hurtado, A. (coord.), Nuevo Atlas Nacional de México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ford, D. y Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Inglaterra: John Wiley and Sons.
- Fragoso-Servón, P.; Bautista, F.; Frausto, O. y Pereira, A. (2014). "Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México" *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 31 (1): 127-137.
- Fragoso-Servón, P. y Pereira, A. (2014). "El karst de la porción este de la Península de Yucatán". *Memorias del XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales*, ISBN 978-607-9232-19-1:2352-2361.
- Freluh, M. (2003). "Geomorphology of karst depressions: polje or uvala - a case of Lucki dol". *Acta Carsologica* Vol. 32 (2): 105-119.
- Jenks, G. F. y Caspall, F. C. (1971). "Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction". *Annals of American Geographers*, Vol. 61:217-244.
- Kueny, J. A. y Day, M. J. (2002). "Designation of protected karstlands in Central America: a regional assessment". *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 64:165-174.
- Mora, L.; Bonifaz, R. y López-Martínez, R. (2016). "Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*: 377-394.