

## **Evaluación de la vulnerabilidad estructural por derrumbes y hundimientos cársicos en el municipio Sierra de Cubitas, Camagüey**

*Evaluation of the structural vulnerability for landslides and karstic subsidence  
in the municipality Sierra de Cubitas, Camagüey*

Mirurgia Aguilar Velázquez <sup>1</sup>\* <https://orcid.org/0000-0003-3737-122X>

<sup>1</sup>Red de Medio Ambiente. Universidad de La Habana, Cuba.

\*Autor para la correspondencia [mirurgia.aguilar@instec.cu](mailto:mirurgia.aguilar@instec.cu)

### **RESUMEN**

La investigación tributa a la realización de los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) que se desarrollan en Cuba. Su objetivo fundamental fue evaluar la vulnerabilidad estructural ante hundimientos del suelo por desplome de cavernas en el municipio Sierra de Cubitas, provincia Camagüey. Se realiza la fundamentación teórica y evaluación en el área de estudio a partir de la propuesta de cálculo; se aporta el concepto de “vulnerabilidad estructural” ante hundimientos del suelo por desplome de cavernas, y nuevas herramientas para su análisis y mejor enfrentamiento ante el peligro de origen natural geológico. Se establecen prioridades e incorporación de medidas integradoras para la etapa preventiva en las proyecciones y planes económicos futuros, la contribución para la toma de decisiones en las diferentes etapas del proceso constructivo. A partir de los resultados obtenidos, se actualizan los planes de las entidades y zonas de defensa, para establecer sistemas de alerta temprana ante las afectaciones que se pueden producir al patrimonio construido y la necesidad del conocimiento del fenómeno para obras a proyectar; la preservación de la calidad de los recursos acuíferos subterráneos, la gestión para la reducción del riesgo a nivel local, la capacitación, divulgación y sensibilización de la población para elevar la percepción del riesgo, que pueda servir como referente para otras investigaciones. La propuesta se valora mediante el criterio de los expertos, lo que indica su pertinencia en la evaluación de la vulnerabilidad estructural y la prevención o mitigación de los eventos naturales.

**Palabras clave:** hundimientos del suelo; desplome de cavernas; vulnerabilidad estructural; gestión de riesgo.

### **ABSTRACT**

*The research is subject to the studies of Hazard, Vulnerability and Risk (PVR) that are developed in Cuba and as a fundamental objective: to evaluate the structural vulnerability to soil subsidence due to the collapse of cavern in the municipality of Sierra de Cubitas, Camagüey province. The theoretical foundation and assessment in the study area based on the proposed calculation; the concept of structural vulnerability contributed to soil subsidence due to cavern collapses and new tools for analysis and better confrontation with the danger of natural origin geological. It establishes priorities and incorporates integrative measures for the preventive stage in the future economic plans and plans, the contribution to decision making in the different stages of the construction process. From the results obtained; the plans of the entities and defense zones are updated so as to establish early warning systems in view of the damage that can be caused to the built heritage and the need to know the phenomenon for works to be projected; preservation of the quality of groundwater resources; management for risk reduction at the local level; the training, dissemination and sensitization of the population to raise the perception of risk and serve as a reference for another research. The proposal is assessed based on expert judgment, indicating its relevance in the assessment of structural vulnerability and the prevention or mitigation of natural events.*

**Keywords:** soil subsidence; cavern collapse; structural vulnerability; risk management.

Enviado: 3/3/2023

Aprobado: 4/9/2023

## **INTRODUCCIÓN**

En Cuba se trabaja en varios programas de gestión de riesgos de desastres naturales, rectorados por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) que, a su vez, ha responsabilizado a la Agencia de Medio Ambiente (AMA) para realizar los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres. Existen otras instituciones y sociedades

relacionadas por su perfil y actividades con las geociencias, como la Sociedad Espeleológica de Cuba (SEC), la Sociedad Cubana de Geología (SCG), el Instituto de Geografía Tropical (IGP), el Instituto de Geología y Paleontología (IGP). Estos han contribuido en gran medida al conocimiento de la geografía de nuestro subsuelo, el estudio de las regiones cársticas, la paleontología de los restos fósiles que aparecen en las cavernas, la mineralogía de las formaciones cristalinas y la historia de la naturaleza cubana.

Los peligros de origen natural, específicamente los geológicos, como manifestación de los procesos dinámicos que ocurren en nuestro planeta, pueden transformarse en desastres en la medida en que no se conozca adecuadamente su amenaza y la susceptibilidad que presenta el entorno ante ellos.

Un universo, de increíble belleza e inigualable riqueza natural y social, se extiende bajo nuestros pies lejos aún de ser conocido y explorado, constituido por miles de kilómetros de galerías subterráneas formadas por la lenta acción de las aguas superficiales y subterráneas. En cualquier rincón del planeta el mundo subterráneo es uno de los ambientes naturales más extraordinario; su singular fauna y escasa flora, su riqueza cultural, los importantes recursos minerales e hidráulicos, convierten al medio ambiente subterráneo en uno de los entornos más frágiles y vulnerables que existen en la tierra (Iturralde, 2008).

La baja percepción de la población, las debilidades para la atención de situaciones de desastres y la situación económica de un área geográfica contribuyen a tener un mayor riesgo. Por lo tanto, las consecuencias potenciales no solo están relacionadas con el impacto del suceso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y las implicaciones del mismo en el área geográfica afectada.

Los estudios de vulnerabilidad realizados a infraestructuras constituyen herramientas para su rehabilitación, pues permiten conocer su comportamiento ante eventos naturales y la adopción de medidas para incrementar, de ser necesario, su seguridad estructural.

El estudio de hundimiento producto al desplome de cavernas es una temática de gran actualidad, aproximadamente en un 66 % del territorio cubano existen rocas más o menos carsificadas, en las que generalmente se desarrollan cavernas correspondientes a formaciones persistentes desde el período Jurásico. En este predominan las formaciones Miocénicas-Cuaternarias. Con estos macizos rocosos carsificados se relacionan los principales acuíferos, construcciones residenciales y fabriles, obras militares, viales, puertos, edificaciones turísticas, aeropuertos, presas, zonas de desarrollo agropecuario y forestal. A pesar de que aproximadamente 66 500 km<sup>2</sup> del territorio nacional está ocupado por suelos carsificados –y si se contara además la plataforma insular, ese porcentaje puede ascender al 80 %–, en Cuba

no se han realizados estudios necesarios referidos al hundimiento de estructuras en este tipo de suelo, atendiendo a la vulnerabilidad, para el logro de una debida conservación del patrimonio cubano.

Se puede plantear que el estudio del carso reviste de gran importancia, porque en zonas con su desarrollo pueden ocurrir hundimientos del terreno producidos por el desplome de techos de cavernas próximas a la superficie o de los sedimentos acumulados sobre paleodolinas, polijas, surcos, entre otras de origen cársico. Los principales daños que pueden causar los hundimientos afectan sobre todo a las infraestructuras y edificaciones; dígase asentamiento diferencial en edificios, lo que puede provocar agrietamientos en la estructura y hasta su colapso, rotura de tuberías, red de alcantarillado o conducciones eléctricas. Si el hundimiento se produce en zonas próximas a un río, a un lago o al océano, dichas zonas pueden sufrir inundaciones más o menos importantes; vaciado de embalses, presas, lagos y lagunas; contaminación de recursos hídricos como consecuencia de roturas en el alcantarillado; pozos negros o balsas de decantación; deformación de pavimentos; entre muchos otros problemas que trae consigo el proceso de carsificación: tanto pérdidas económicas como de vidas humanas, cuestión que hay que tener en cuenta para la ejecución de obras o para la protección de obras ya construidas, al no existir evidencias de estudios que evalúen la vulnerabilidad estructural en terrenos cársicos.

La Sierra de Cubitas constituye el grupo orográfico más importante de la provincia de Camagüey con un predominio de topografía cársica. Esta investigación abordará detalladamente la situación constructiva de obras afectadas estructuralmente en este municipio.

Según estudios realizados por la Agencia de Investigaciones Regionales acerca de los hundimientos de suelo en Sola-Camagüey, cuyos autores fueron los doctores Félix Quintas Caballero y José Manuel Cordobés Pedrianes (2007), así como por la confección del informe acerca del Pronóstico de los Hundimientos del Terreno en Zonas Cársicas, entre otros estudios, se llega a la conclusión de que no existen metodologías integrales o procedimientos de cálculo para evaluar la vulnerabilidad estructural de los hundimientos del terreno producto a la aparición del carso, ni una apreciación suficiente de este peligro en el país, lo que se evidencia en la omisión dentro de los peligros de origen natural que más nos afectan.

Lo anteriormente expuesto conduce a plantear como objetivo evaluar la vulnerabilidad estructural por derrumbes y hundimientos cársicos en el municipio Sierra de Cubitas.

## MÉTODOS

La investigación se realizó a partir de la propuesta metodológica en la que se tienen en cuenta criterios y factores geológicos. Las unidades de análisis empleadas fueron: área geológica (cuenca hidrogeológica) y consejos populares con un enfoque territorial. Entre los materiales utilizados se encuentran la información documental y cartográfica, con la que se fundamentaron las bases teóricas-metodológicas y se caracterizó el área objeto de estudio. Además, se empleó el Modelo Digital de Terreno (MDT) en formato ráster con extensión *grd* (tamaño de pixel igual a 5x5m), con el cual se obtuvieron los índices hidromorfométrico que se emplean para la delimitación espacial de la zona propuesta. Se utilizaron los SIG como una herramienta fundamental, lo que facilitó el almacenamiento, acceso y análisis de datos, en forma de mapas; entre los *softwares* principales se encuentran: MapInfo 12.5, ArcGis y *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA) en su versión: v.4.01.

Los métodos del nivel teórico empleados fueron:

- Método analítico-sintético: se usó para descomponer el objeto de estudio en los principales elementos que lo conforman, para determinar sus particularidades y simultáneamente, mediante la síntesis, descubrir relaciones y características generales.
- Método hipotético-deductivo: permitió derivar a partir de determinados principios, teorías o leyes, respuestas que explican el objeto de estudio y que vuelven a ser confirmadas en la práctica.
- Método sistemático: se utilizará para proporcionar el objetivo general del estudio como una realidad integral formada por elementos que interaccionan uno con otros.

Como métodos del nivel práctico aparecen:

- Análisis e interpretación de documentos: para obtener información y datos derivados del estudio del curso en Cuba y en Sierra de Cubitas, textos y de la revisión de informes vinculados al peligro por hundimientos en terrenos cársicos.
- Estadístico: se aplicaron técnicas de la estadística descriptiva para organizar y procesar la información recopilada, se utiliza el método de Pareto para el descarte

de zonas o regiones del área de estudio donde las estructuras no sean gravemente vulnerables por los derrumbes y hundimientos cárnicos.

- Observación: comportamiento de los actores y factores que intervienen en la apreciación del peligro por carso.
- Criterio de expertos: para consensuar criterios acerca de la propuesta metodológica para el levantamiento, funciones y la apreciación del riesgo por carso.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Marco teórico de los derrumbes y hundimientos cárnicos para la gestión en la reducción del riesgo de desastres**

En los procesos de los derrumbes y hundimientos cárnicos intervienen factores de índole natural que inciden en la superficie terrestre, estos pueden ser inducidos por un movimiento en el que predomina el sentido vertical descendente y que tienen lugar en áreas de distintas características y pendientes. El resultado es la apertura de una oquedad en el exterior, de dimensiones y trazado variable (la mayor parte de las veces es circular, ovalada o elíptica) que rápidamente comienza a colmatarse y adquiere una morfología embudiforme. Este movimiento puede ser generado por distintas causas y se puede desarrollar con velocidades muy rápidas o muy lentas, según el mecanismo que da lugar a tal inestabilidad, que responde a las características del medio y, en especial, al tipo de terreno donde se desarrolle. Los terrenos cárnicos resultan vulnerables a los hundimientos, pues uno de los factores que lo propician es la existencia de cavernas y oquedades en el interior de la superficie terrestre, formadas por la disolución de las rocas.

Con el paso del tiempo las cuevas en ocasiones sufren una ruptura o desplome de la parte superior (techo) y, por consiguiente, ocasionan una absorción hacia su interior de todo material o elemento que esté por encima causando disímiles daños. Otro factor que puede ocasionar un hundimiento en los techos de cavernas son las oquedades de la corteza terrestre por donde circula la escorrentía de las aguas provenientes de los ríos, arroyos, lagunas, o la propia lluvia, que quedan cubiertas por los suelos redepositados producto de la erosión en la superficie terrestre, lo que favorece el asentamiento o hundimiento.

Siempre que se hable de estructuras es de gran importancia el conocimiento de los factores externos que puedan interferir, así como todo aquello que pueda atentar con su durabilidad o vida útil.

La gran labor que representa el diseño de una obra arquitectónica desde su etapa de concepción de proyecto hasta la etapa de ejecución sería en vano si no se desarrollan investigaciones acerca de la probabilidad que tengan para resistir los distintos fenómenos a los que pueden ser expuestas ya sean de índole natural o provocado por negligencia del hombre (en toda su proyección), lo que en su probabilidad no se evidencie siempre, estaría en dependencia del tipo de obra y la envergadura que requiera, siendo este un aspecto de gran importancia no solo para las futuras construcciones, sino para las que ya están creadas.

Muchas obras en nuestro país fueron ejecutadas sin tener en cuenta la aplicación de normas de construcción, por el hecho de que no habían sido estudiadas; además, existe la posibilidad de que otras fueron ejecutadas por el hombre bajo sus necesidades inmediatas, lo mismo en zonas de bajo como de alto riesgo constructivo. Por consiguiente, se habla de la relación hombre-estructura-vulnerabilidad, lo que se traduce como vulnerabilidad estructural.

Existen varias definiciones de vulnerabilidad estructural en correspondencia al tipo de fenómeno que se evidencie en el entorno constructivo, el cual puede interferir de manera relevante o no en la propia obra, ya sea de tipo estructural o vial.

La vulnerabilidad (V) se define como la probabilidad de que un sistema social se vea afectado. También se define como la probabilidad de que lo expuesto para ser dañado por la acción de un peligro con determinada severidad (Ayala, 2002 b).

Según el colectivo de autores que desarrollaron la metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones, “vulnerabilidad estructural” es la susceptibilidad que la estructura presenta frente a posibles daños en aquellas partes del establecimiento que lo mantienen en pie. Esto incluye cimientos, columnas, muros, vigas y losas.

La autora define la “vulnerabilidad estructural” como el grado de peligro a la que pueden ser expuestas las edificaciones (estructural o vial) si no se tienen en cuenta las normas adecuadas para la construcción de esta, para mitigar riesgos de hundimiento o asentamiento (Aguilar, 2020).

Existen estudios que evalúan la vulnerabilidad estructural ante un fenómeno natural (por sismos), pero no existen registros de una investigación realizada referente a la vulnerabilidad estructural ante hundimientos del suelo por desplome de techos de cavernas desarrollados en territorios cárnicos. Con este trabajo se pretende dar respuesta a esta problemática, por lo que, a modo de apropiación de los autores y consenso para el mejor entendimiento de esta investigación, se toma como concepción viable la definición de la vulnerabilidad estructural ante hundimiento del suelo para fundamentar las bases teóricas de la investigación. Quedando definida por la autora la “vulnerabilidad estructural por los derrumbes y hundimientos

cársicos” como la susceptibilidad que manifiesta la estructura ante posibles daños en algunos de sus componentes producto al grado de impacto que pueda propiciar la acción de un hundimiento o asentamiento en el suelo sustentado por cavernas cubiertas de suelo que constituya su soporte o que este próximo a ella (Aguilar, 2020).

El análisis y diseño de estructuras en la actualidad requiere de una alta precisión, rapidez y profesionalización del material humano que labora en este empeño, para lograr estructuras seguras al menor costo posible. El análisis se realiza con el propósito de evaluar la seguridad de edificaciones existentes o por construir. La evaluación se hace en estructuras que hayan sido o no dañadas, e indican si es necesario el refuerzo estructural o la invalidación de ejecución esta, con la finalidad de asegurar el funcionamiento ininterrumpido de un establecimiento con posterioridad a un fenómeno que puede darse, lo mismo de forma natural como producido por la acción del hombre, al ser este un factor de especial atención por su estrecha relación con el medio constructivo.

El análisis de la vulnerabilidad estructural debe indicar, entre otros factores, las deficiencias de la estructuración, configuración física, resistencia y rigidez de sus elementos, así como su grado de operación y mantenimiento, a partir de su comportamiento, que rige la seguridad y funcionalidad de la estructura, lo que la hace vulnerable, por lo que es de suma importancia la atención a cada uno de estos aspectos en dependencia de cómo pueden verse afectados, y como podrían responder ante un evento inesperado que se produzca sin predicción (fenómenos naturales o inducidos por el hombre), los que constituyen un peligro para las estructuras y viales, producto de que siempre que exista una estructura en su medio de desarrollo, esta se hará vulnerable y podría verse afectada; incluso, dejar de existir o desaparecer sin dejar rastro, todo en dependencia de la magnitud que tenga este fenómeno cársico y de la capacidad de resistir la estructura. Es importante destacar que el hecho de diseñar de acuerdo con un código o informe preventivo no siempre salvaguarda a la estructura contra el daño que pueda producir un fenómeno cársico.

En junio de 2005, según estudios de riesgo por hundimientos en zonas urbanas y conurbadas desarrollados, varios autores definen el peligro (P) como: la probabilidad de ocurrencia de un evento o fenómeno de cierta intensidad que puede causar daño en un lugar determinado por el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC, 2005).

También se define como proceso o fenómeno de carácter natural o antropogénico (tecnológico) que puede originar daños a la población, los bienes, servicios o el medio ambiente natural (Olcina y Ayala, 2002).



El hundimiento del suelo producto del desplome de cavernas es uno de los peligros más grandes que atentan contra la vida funcional y de servicio de una estructura, que, a pesar de ser geológicos, puede verse inducido o influenciado por fenómenos hidrometeorológicos, ya que estos hacen vulnerables el suelo y propician daños en dependencia del nivel de exposición que tengan.

El peligro por hundimiento es la probabilidad de movimiento vertical, por acción y efecto de la gravedad, que afecta y desplaza el suelo, el terreno o algún otro elemento de la superficie terrestre (Olcina y Ayala, 2002).

Este movimiento vertical del suelo propicia que el efecto que se evidencie en la estructura no siempre tenga el mismo grado de afectación sea hundimiento, asentamiento, desestabilizaciones estructurales en algunos de sus componentes como cimientos, vigas, columnas, cubiertas o uniones, sino que los daños sean directamente proporcionales a raíz del nivel de exposición y demás factores que intervengan; lo que muestra cuán vulnerable han sido y pueden ser las estructuras ante tal fenómeno, lo que quiere decir que a mayor peligro (P) mayor vulnerabilidad estructural (Ve).

Las tipologías constructivas dependen de la disponibilidad de recursos, medios y del carácter constructivo que tenga la obra, por lo que no en todos los casos contará con los mismos materiales y sistemas a emplear, lo que propicia que en dependencia de lo aplicable a ella sean las afectaciones que se puedan presentar en esta. Aunque existen deficiencias estructurales, es importante recalcar que hay muchos daños que se pueden presentar sin importar estos elementos expuestos (materiales y sistemas constructivos) ante un hundimiento o movimiento del suelo resistente de dicha estructura. Estos daños producidos específicamente por hundimientos pueden ser de menos a más en dependencia del grado de vulnerabilidad que presente la zona donde radique la estructura, tal es el caso de posibles grietas o fisuras, pandeo en elementos constructivos, asentamientos del suelo, y en caso desfavorable el derrumbe total producto al colapso cavernoso que da lugar al hundimiento cárstico.

De producirse un colapso en el techo cavernoso del suelo donde se sustente una estructura, y a su vez abarque toda su extensión y altura, se estaría en presencia de la máxima afectación estructural posible. Ante tal situación solo se podría proceder a la invalidación de la reestructuración o construcción en esta zona de peligro, riesgo y vulnerabilidad. Este colapso puede verse catalizado por eventos meteorológicos como lluvias, ciclones y huracanes, así como la posibilidad de excesiva humedad o inundaciones en ese terreno, lo que no dependería solamente de un fenómeno natural, sino de las condiciones hidrológicas del lugar o la existencia de desvíos acuíferos o sistemas de drenajes inadecuados al propio suelo, que

responderá de un modo tan agresivo ante tales condiciones o provocaciones. Los terrenos cársicos son el núcleo de formación de los hundimientos y vulnerables a las aguas como se puede constatar, ya que en estas recae la mayor responsabilidad para que se produzcan las oquedades que dan pie a los sumideros, y las reacciones de disolución de la roca, lo que hace que estos suelos resulten aún más sensibles al colapso.

El estudio de la vulnerabilidad estructural de los derrumbes y hundimientos cársicos se desarrolla no solo teniendo como referente la posibilidad de un colapso, sino para daños de menor grado que afecten directa o indirectamente a las estructuras y viales.

### **Evaluación de la vulnerabilidad estructural por los derrumbes y hundimientos cársicos**

Existen casos de estudios basados en metodologías de cálculo de vulnerabilidad estructural ante disimiles eventos naturales, esta investigación apoyándose en el origen y las características de los desplomes de cavernas así como en método matemático basado en el análisis de Pareto, que es una herramienta estadística que permitir organizar por orden de relevancia los problemas o las causas que los generan, permitiendo que cuando se quiera mejorar un proceso o atender sus problemas se establezcan prioridades y se enfoquen los esfuerzos donde puedan tener mayor impacto o sea, según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20 % de las causas resuelven el 80 % del problema y el 80 % de las causas solo resuelven el 20 % del problema, lo que posibilita el dar soluciones o proponer medidas integradoras a casos puntuales que requieran de mayor atención ante el desplome de cavernas, aspecto que fue priorizado dentro de la investigación desarrollada.

En la porción sur y suroeste del municipio Sierra de Cubitas se sitúan calizas carsificadas en las que se evidencia el desarrollo de importantes sistemas cavernosos específicamente hacia su borde sur. En la llanura norte continua este complejo de rocas carbonatadas que se encuentra cubierto de sedimentos lateríticos redepositados (llamados Formación Villaroja).

Los hundimientos y subsidencias del terreno son movimientos verticales que pueden producirse en tres tipos de fenómenos, que son: hundimientos de cavidades subterráneas en rocas con reflejo o sin reflejo en la superficie, ejemplo hoyo de Bonet y dolinas de la Sierra de Cubitas (posibles hundimientos en Sola 6; hundimientos superficiales en rocas y suelos (hundimientos del terreno observados en Sola 2, Vilató y El Colorado y otras localidades del municipio Sierra de Cubitas), la subsidencia o descensos lentos de la superficie del terreno y

procesos muy lentos relacionados con descensos del nivel de las aguas subterráneas, con la minería subterránea y túneles, con la extracción de petróleo y gas, explotación intensiva de acuíferos, disolución y lavado de materiales en el subsuelo y otros.

Los hundimientos de cavidades cársticas y del suelo se producen por movimientos repentinos. En las cavidades cársticas están presentes materiales rocosos solubles, lo que permite el desarrollo de cavidades subterráneas que provocan estados de desequilibrio e inestabilidad lo que bien puede dar lugar a la rotura de bóvedas subterráneas y hundimientos del terreno.

Los procesos de erosión de los materiales de relleno de cavidades cársticas pueden dar lugar a hundimientos del terreno con posibles afectaciones a obras civiles cercanas: carreteras, puentes, edificios, entre otras (Quintas y Cordovez, 2007).

Según los autores, en Sierra de Cubitas el proceso de erosión es uno de los factores principales que originan los desplomes verticales de techos cavernosos existentes, debido a la gran extensión de suelos rojizos y áreas de vegetación que constantemente son arrastrados y redepositados por aires proveniente de cualquier dirección y fuertes lluvias que los trasladan hacia sus cavidades cársticas, lo que hace que estas sean más vulnerables al hundimiento. Por lo que los autores consideran que estos suelos redepositados constituyen un aumento de fuerzas poco resistibles a estas cavernas generadas por la erosión y que eventualmente podría llevar el techo de estas al colapso total, al ejercer una presión vertical ascendente no siempre considerable.

Entre los factores geológicos condicionantes de los hundimientos del terreno en el municipio Sierra de Cubitas los más importantes son: la presencia de un complejo de rocas carbonatadas altamente carsificadas (Grupo Remedios, Formación Embarcadero y Lesca) en superficie o cercanos a la superficie, que en ocasiones aflora en pequeñas áreas en las zonas del plan citrícola, su cobertura en las zonas con carso cubierto relacionadas con la Formación Villarroja, que está propagada en la llanura algo ondulada al norte de Sierra Cubitas y que rellena las dolinas del complejo carbonatado (Quintas y Cordovez, 2007).

En la zona el drenaje es subterráneo y el nivel de las aguas freáticas se encuentra como máximo a unos 20 metros de profundidad. Las aguas de escorrentía se infiltran en mayor volumen en las zonas donde se localizan las antiguas dolinas, en el fondo de estas existen normalmente ponores por donde penetra el agua hacia sistemas espeleanos.

Al ocurrir la infiltración de las aguas superficiales, estas se mueven y convergen hacia los ponores del fondo de las dolinas, aumentando su caudal y su capacidad de erosión, la que se produce al irse removiendo las partículas más finas, quedando en las zonas de infiltración el material que da lugar a un embudo o sumidero. En la etapa de desarrollo, donde se originan

los sumideros, el volumen de agua que se infiltra por esas zonas aumenta al igual que su turbulencia lo que da lugar a excavaciones laterales en las zonas profundas del sumidero que avanzan lateralmente paulatinamente creando oquedades dentro de la masa detrítica infrayacente. Este proceso se desarrolla hasta alcanzar un momento crítico en que se produce el desplome o colapsamiento del terreno.

El levantamiento se realizó en las 5 zonas del municipio específicamente en todas las viviendas e instituciones afectadas tal es el caso de Sola 6, Sola 2 y las próximas a un hundimiento como es el caso de Vilató, Imias y Yagunal, así como en Sola, teniendo en cuenta que, a pesar de ser muchas las vivienda afectadas y las extensas áreas vulnerables al hundimiento, se tomaron muestras de estas debido al método estadístico que se aplica para la determinación del grado de vulnerabilidad estructural y no estructural para cada una de las localidades implicadas y viales en el municipio de Sierra de Cubitas.

A partir del análisis y la discusión desde el grupo de investigación, y las experiencias registradas, se ha logrado desarrollar una metodología de trabajo que puede ser aplicada a cualquier estructura que requiera un estudio de vulnerabilidad sobre la base de métodos analíticos y matemáticos que posibilitan la deducción de resultados válidos como respuesta al problema existente.

Una vez realizado el levantamiento del fondo habitacional e instalaciones de importancia a través de la herramienta determinada, se procede al análisis de cada una de las variables cualitativas y cuantitativas presentes, que se definieron a partir de los valores resultantes obtenidos, tabulados en Microsoft Excel para el análisis lógico de estos, que concluyó con un descarte de variables que no constituían factores de importancia para la determinación de la vulnerabilidad estructural debido al hundimientos del suelo por desplome de cavernas. Aun así, estos fueron validados en la herramienta de apoyo utilizada en el levantamiento por su importancia a la hora de actuar o tomar medidas de conservación y mantenimiento. Luego de definir cuáles serían las variables a tomar en cuenta para el análisis probabilístico, se exportan cada uno de los datos necesarios a Statgraphics, donde se realiza como primera necesidad los diagramas de sectores por variables independientes, de acuerdo con la zona de análisis, para las seis localidades de estudio, como se muestra a continuación.

En el anterior análisis estadístico realizado a cada una de las variables, tanto cualitativas como cuantitativas, se pudo obtener un descarte de variables propuestas para la determinación de la vulnerabilidad estructural ante hundimientos del suelo por desplomes de cavernas que no constituían factores de riesgo a tomar en cuenta a la hora de determinar la vulnerabilidad de una zona o región determinada, y quedaron vigentes las de mayor repercusión, delimitadas

anteriormente con colores rojos y amarillos. Las soluciones verdes representan una escasa posibilidad de que dicho rasgo influya determinadamente en una estructura como para volverla totalmente vulnerable.

Posteriormente se procede a la suma de cada valor representativo de color rojo por variables en cada una de las zonas, los cuales introducidos en la base de datos de Statgraphics se exponen al análisis de Pareto, donde se realiza la comparación entre una localidad u otra y en dependencia del porcentaje individual de cada una se obtiene un resultado en cuanto a: bajo, medio o alta vulnerabilidad estructural.

Los asentamientos Yagunal y Sola se evalúan con alta vulnerabilidad estructural ante hundimientos del suelo por desplome de cavernas en el municipio Sierra de Cubitas, inciden en Yagunal 5 viviendas que son expuestas y en Sola 32 viviendas, así como 12 instalaciones de importancia. Vulnerabilidad estructural media en los asentamientos de Vilató e Imías, corresponden 15 viviendas y 5 instalaciones de importancia afectadas en Vilató y para el asentamiento Imías, 6 viviendas afectadas y 2 instalaciones de importancia. Y se verán afectadas 6 viviendas aisladas evaluadas de baja.

Por la importancia que presentan como las vías de acceso y la conexión entre comunidades cercanas, los autores realizaron el levantamiento en 6 puntos de los viales y 4 puntos en la vía férrea, y de esta forma destacar que existen otras vulnerabilidades como la no estructural que presenta una alta predisposición a sufrir pérdidas o daños.

Teniendo en consideración los resultados antes mencionados los indicadores que más inciden en los asentamientos para la evaluación de la vulnerabilidad estructural es lo referido a la tipología constructiva y el estado general de mantenimiento.

Se considera que la investigación de vulnerabilidad estructural por los derrumbes y hundimientos cárnicos requiere de un aumento de desarrollo local en cada zona del municipio y territorio que lo requiera, al ser este peligro para las edificaciones existentes y las nuevas proyecciones y una directa relación con los viales. El desarrollo de este nuevo método de cálculo es aplicable a metodologías de vulnerabilidad a estructuras dañadas y no afectadas por este peligro de origen geológico, es solo un comienzo de respuestas lógicas y exactas, que respondan a la necesidad de contrarrestar dicho problema investigativo, el cual deberá valorarse por las instituciones a cargo de obras ingenieriles, la Defensa Civil y el propio hombre.

En materia de apoyo los autores desarrollan un plan de medidas integradoras a tener en cuenta para enfrentar los procesos de hundimientos por desplomes de cavernas en el municipio Sierra de Cubitas.

## CONCLUSIONES

El estudio permite fundamentar las bases teóricas y metodológicas, y se aporta el concepto de “vulnerabilidad estructural” por los derrumbes y hundimientos cársicos, y nuevas herramientas para su análisis.

A partir de la utilización del método de Pareto para la evaluación de la vulnerabilidad estructural, se obtiene vulnerabilidad alta para los asentamientos Yagunal y Sola, vulnerabilidad media para Imias y Vilato, y baja vulnerabilidad en edificaciones aisladas, aunque puede existir probabilidad de que se produzcan en un tiempo y en un lugar determinados eventos potencialmente destructivos, con un grado de severidad capaz de crear una situación de desastre debido al grado de los daños a la población, la economía, la infraestructura y al medio ambiente.

Se identifica una alta predisposición a sufrir pérdidas o daños en 64 viviendas del fondo habitacional, 19 instalaciones de importancia de los elementos expuestos al impacto de este peligro en el municipio Sierra de Cubitas, y otras vulnerabilidades en consideración que repercuten como son la no estructural (afectación a vías y redes), social (asentamientos poblacionales afectados) y la económica.

Se propone un plan de medidas integradoras para la etapa preventiva con el objetivo de disminuir los daños ante los derrumbes y hundimientos cársicos en las obras a proyectar y construidas.

La valoración realizada por los expertos referentes a la propuesta del cálculo de la vulnerabilidad estructural por los derrumbes y hundimientos cársicos, indica la factibilidad de su implementación, corroborado por los resultados de los análisis cualitativos y cuantitativos que lo catalogan como muy adecuado para aplicarlo en estudios de este peligro geológico y para una mejor gestión en la reducción de riesgos a nivel local.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M. (2020). Estudio del peligro cársico en el municipio Sierra de Cubitas, Camagüey.
- CEPRENAC (2005). La gestión local del riesgo. Concepto y Prácticas.
- Iturralde, M. (2008). *Desastres de Origen Geológico: Causas y Prevención*. La Habana.
- Olcina Cantos, J. & Ayala Carcedo, F. J. (2002). Riesgos naturales.

Quintas, F. & Cordovez, J. M. (2007). *Informe sobre hundimientos de suelo en Sola-Camagüey*. Camagüey: ENIA.

### **Conflicto de intereses**

La autora declara que no existe conflicto de intereses.