

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA

*Evaluación de la validez del sistema de indicadores que
condicionan la licuefacción de suelos.*

Autora: Roxana Sanamé Almira.

Tutor: Ing. Daniel Núñez Elías.

Moa, julio de 2019

PENSAMIENTOS

*No hay sabiduría, ni inteligencia, ni consejo, contra
Jehová.*

Proverbios 21:30

*Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene
el conocimiento y la inteligencia.*

Proverbios 2:6

DEDICATORIA

A DIOS en primer lugar, por tomarme siempre de la mano y hacer realidad el futuro que trazó para mí, al otorgarme el regalo de convertirme en una profesional. A ÉL debo lo que soy.

A mi madre Ana Rosa Almira Meléndez, por mostrarme su amor sincero, apoyo incondicional y total sacrificio, por reconocer mis logros y guiarme siempre en el buen camino.

A mi padre Omar Sanamé Lobaina, por todas las muestras de su cariño y por prestar especial atención a los resultados que he obtenido.

A mi hermana Rocío Sanamé Almira, por estar siempre a mi lado y cautivarme con su entusiasmo y sus actitudes emprendedoras.

A mis abuelos Víctor Almira Quintana, Benilde Sanamé Domínguez y Ana Dolores Lobaina Furones, por informarse constantemente sobre mi progreso en la tesis.

A mis tías Marisol Sanamé Lobaina y Ana Luisa Meléndez Almira, por tenerme siempre presente.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS primeramente, porque su paz e infinito amor reposaron sobre mí para alcanzar esta meta con perseverancia.

A mis familiares más cercanos, por ser las personas más interesadas en la culminación satisfactoria de mis estudios universitarios.

A mi tutor Daniel Núñez Elías, por sus orientaciones claras y certeras, así como su excelente dedicación durante la realización de mi tesis.

A mis compañeros de aula, particularmente a Katerin, Anita y Liane; por su ayuda oportuna y por ser parte de los momentos más maravillosos de mi carrera universitaria.

A Liuska Fernández Diéguez, por contribuir significativamente con mi familiarización en lo referente a la licuefacción de suelos.

A los profesores de la Facultad de Geología, por el esmero con que impartieron sus clases durante estos 5 años.

A Elianis Zúñiga Rodríguez, Idalmis Rodríguez Castelnaux y a todas las personas especiales que, de una manera u otra, me apoyaron durante el desarrollo de mi investigación.

RESUMEN

La validación matemática constituye una herramienta óptima para estudiar los hechos científicos. Uno de los fenómenos naturales más catastróficos inducidos por un sismo, que permite ser evaluado desde el campo de la matemática, es la licuefacción de suelos. La presente investigación surge por la necesidad de validar matemáticamente el sistema de indicadores utilizado en la evaluación del potencial licuable de suelos, propuesto por Fernández (2015), para su utilización efectiva y eficaz en la delimitación de escenarios susceptibles a este fenómeno natural. Se planteó como objetivo evaluar la validez del sistema de indicadores como primer paso en el proceso de validación matemática. Para ello se contó, como material de estudio, con la tesis de maestría de Fernández (2015) titulada “Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba”. El método utilizado en la comprobación de la validez fue el coeficiente de concordancia de Kendall. Se empleó, además, el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25. Se concluyó que el sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) no cuenta con un proceso matemático de validación para consolidar su utilidad según el fin con que fue diseñado. La aplicación del coeficiente de Kendall demostró la no concordancia entre los criterios asignados a los autores por parte de Fernández (2015) para un valor=0,189. Para el consecuente logro de la validación efectiva del sistema de indicadores se sugirió tener en cuenta el método Delphi, la redefinición de las características de los indicadores apoyada en una ficha de medición de éstos, así como la correspondencia entre el área de estudio y la representatividad de la muestra.

ABSTRACT

Mathematical validation is an optimal tool to study scientific facts. One of the most catastrophic natural phenomena induced by an earthquake that can be evaluated from the field of mathematics is the liquefaction of soils. The present investigation arises from the need to validate mathematically the system of indicators used in the evaluation of the liquefiable potential of soils, proposed by Fernández (2015), for its effective and efficient use in the delimitation of susceptible scenarios to this natural phenomenon. The objective was to evaluate the validity of the system of indicators as a first step in the mathematical validation process. To this end, as a study material, Fernández's thesis (2015) entitled "Liquefaction of soils generated by large-scale earthquakes. Case study Caimanera and Santiago de Cuba". The method used in the verification of validity was the Kendall concordance coefficient. The SPSS Statistics Viewer software was also used. Version 25. The system of indicators proposed by Fernández (2015) does not have a mathematical validation process to consolidate its usefulness according to the purpose for which it was designed. The application of the Kendall coefficient demonstrated the non-agreement between the assigned criterias to the authors by Fernández (2015) for a value=0.189. The application of the Delphi method, the redefinition of the characteristics of the indicators supported on a tab of measurement of these, as well as the correspondence between the study area and the representativeness of the sample were suggested for the consequent achievement of the effective validation of the system of indicators.

ÍNDICE

PENSAMIENTOS.....	I
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Trabajos de validación matemática de sistemas de indicadores.....	5
1.3 Regularidades de los métodos de validación matemática.....	7
1.4 Características generales del fenómeno licuefacción.	7
Concepto.....	7
Origen	7
Factores	8
Condiciones para que un suelo sea licuable	9
Efectos	9
Criterios de susceptibilidad	11
Efecto de sitio como catalizador de licuefacción de suelos.....	12
1.5 Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.	13
1.6 Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.	15
1.7 Conclusiones.....	18
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	19

2.1	Introducción.....	19
2.2	Metodología de trabajo.....	19
2.3	Materiales.....	22
2.4	Método de validación aplicado (Coeficiente de Kendall).....	22
2.5	Conclusiones.....	27
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....		28
3.1	Introducción.....	28
3.2	Establecimiento de los indicadores.	28
3.3	Origen de los datos.	29
3.4	Limitaciones de sistema de indicadores.....	31
3.5	Representatividad de la muestra en la aplicación del sistema de indicadores.	33
3.6	Comprobación de la validez de los indicadores.	36
3.7	Sugerencias para mejorar la validación.	39
3.8	Conclusiones.....	40
CONCLUSIONES.....		41
RECOMENDACIONES		42
BIBLIOGRAFÍA		43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efectos de la licuefacción de los suelos para el hombre.
(<https://concienciaradio.com/liquefaccion/>)..... 11

Figura 2. Influencia del efecto de sitio en la licuefacción del suelo.
(<https://concienciaradio.com/category/chiapas/feed/>)..... 13

Figura 3. Introducción de los datos en el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25. 37

Figura 4. Resultados del cálculo del coeficiente de concordancia de Kendall en el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25. 38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción. (Fuente: Instituto de Investigaciones en Salud de la Población).	17
Tabla 2. Análisis de los criterios de los autores consultados y valores asignados.	30
Tabla 3. Descripción del sistema de indicadores.	32
Tabla 4. Tabla de puntuaciones.	37
Tabla 5. Ficha de medición de cada indicador.	40

INTRODUCCIÓN

Los saberes adquiridos sobre un fenómeno natural determinado evolucionan desde un conocimiento empírico de sus características hasta la elaboración de una teoría científica sólida que los convierta en ley. Esta evolución debe ser mediada por un conjunto de métodos objetivos y rigurosos que validen cuantitativamente los resultados de la experimentación de forma que se ofrezca un acercamiento crítico de la realidad sin dejar de cuestionarla permanentemente y sin detenerse en lo aparente ni en lo sensorial. De aquí que la primera característica que debe tener el conocimiento científico es su objetividad, dada por el hecho de que sea válido para todos.

A lo largo de la historia de la ciencia ha surgido la necesidad imperante de validar los conocimientos. Cuantiosas han sido las vías para lograr este fin, pero se impone la veracidad de un proceso que demuestra con datos exactos el fundamento de los planteamientos científicos: la validación matemática.

La validez es un criterio de evaluación utilizado para determinar cuán importantes son la evidencia empírica y los fundamentos teóricos que respaldan un instrumento, examen o acción realizada. También, es entendida como el grado en que un instrumento, encuesta o sistema mide lo que pretende medir (evaluar) o que cumple con el objetivo para el cual fue construido, este criterio es fundamental para considerar válida una prueba (Urrutia et al. 2014).

La validación de un método o procedimiento es el proceso para confirmar que el procedimiento analítico utilizado para una prueba en concreto es adecuado para su uso previsto. Los resultados de la validación del método pueden utilizarse para juzgar la calidad, la fiabilidad y la constancia de los resultados analíticos, se trata de una parte integrante de cualquier buena práctica analítica (Huber, 2007).

Dentro de la ciencia geológica, uno de los fenómenos naturales más catastróficos inducidos por un sismo, que permite ser evaluado desde el campo de la matemática, es la licuefacción de suelos. Su efecto consiste en la pérdida de resistencia de suelos poco cohesivos que, al estar saturados de agua como

resultado del aumento de la presión en los poros por fuertes vibraciones sísmicas, cambian de estado sólido a líquido.

Los estragos que acarrea este fenómeno son alarmantes, puesto que eleva el grado de vulnerabilidad con sus efectos. El impacto de ello se traduce en problemas como: inclinación, arrastre y/o colapso de estructuras, ruptura de tuberías de distribución de agua y gas, desprendimiento de cables eléctricos subterráneos de servicio público y desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y de playa; sin dejar de aludir a la irreparable pérdida de vidas humanas como consecuencia del gran volumen de material licuado que las ha sepultado súbitamente. Dadas estas circunstancias, se hace apremiante el estudio minucioso de la licuefacción de suelos para tener en cuenta la percepción del riesgo de desastres.

Desde 1969 a nivel mundial han sido numerosas las metodologías propuestas por autores (Kishida, 1969; Seed & Idriss, 1971, 1982; Iwasaki et al. 1978; Yegian y Whitman, 1978; Wang, 1979; Seed et al. 1983; Tokimatsu y Yoshimi, 1981, 1983; Youd e Idriss, 2001; Seed et al. 2003) para cuantificar la licuefacción. Su empeño se ha orientado a la evaluación de la composición, el estado y la capacidad de resistencia de los suelos; se recurre a diferentes pruebas como: penetración estándar (SPT), penetración con cono (CPT), velocidad de ondas de corte (V_s) y penetración Becker (BPT).

En el ámbito nacional es de destacar que Fernández (2015) en su trabajo “Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba”, apoyada en el fundamento de investigaciones anteriores, presentó una metodología más global como aporte a este cuadro investigativo, la cual consistió en la propuesta de un sistema de indicadores para la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos, donde se atiende de forma específica la influencia de indicadores determinantes en el alto grado de susceptibilidad de suelos al fenómeno.

En este estudio la autora selecciona, según su opinión, los indicadores más importantes de los analizados por los autores de las metodologías mencionadas,

con la ausencia de un proceso de validación que convierta el sistema de indicadores propuestos en una herramienta con peso cuantitativo sólido para consolidarse como herramienta eficaz para la cuantificación del potencial de licuefacción para los escenarios que se consideran susceptibles al fenómeno.

Sobre la base de esta metodología, a fin de contribuir con la optimización de los estudios de la licuefacción de suelos, la presente investigación encuentra necesaria la propuesta de un mecanismo de validación de dicho sistema de indicadores desde la perspectiva matemática, con lo cual se asegura el análisis del fenómeno con mayor exactitud mediante la jerarquización de los indicadores.

Problema científico:

Necesidad de validar matemáticamente el sistema de indicadores utilizado en la evaluación del potencial licuable de suelos, propuesto por Fernández (2015), para su utilización efectiva y eficaz en la delimitación de escenarios susceptibles a este fenómeno natural.

Objeto de estudio:

Sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015).

Campo de acción:

Validez del sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015).

Objetivo general:

Evaluar la validez del sistema de indicadores como primer paso en el proceso de validación matemática.

Hipótesis:

Si se evalúa la validez del sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015), se podrá validar matemáticamente para potenciar su uso en la delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción.

Objetivos específicos:

1. Sistematizar el conocimiento sobre el objeto de investigación y el campo de acción.
2. Evaluar la concordancia del sistema de indicadores mediante el coeficiente de concordancia de Kendall.
3. Proponer un procedimiento para la completa validación matemática del sistema de indicadores.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.

1.1 Introducción.

La comprobación de la validez de una teoría, modelo o sistema es clave para su utilización efectiva para el uso con el cual fue creado. La necesidad de validar los sistemas propuestos como resultado de la experimentación o el estudio exhaustivo de un objeto científico permite dotar al investigador de elementos cuantitativos que respalden su investigación. Muchas veces obviamos estos elementos de peso significativo en la ingeniería y tratamos como cualitativos datos que tiene un indiscutible origen cuantitativo.

En este capítulo se realiza una caracterización del fenómeno natural en estudio como primer acercamiento a la necesidad de estudiarlo desde el punto de vista matemático. De igual forma se abordan elementos generales de la validación matemática en diferentes esferas de la ciencia.

1.2 Trabajos de validación matemática de sistemas de indicadores.

Los trabajos de validación de resultados de investigación implican la utilización de herramientas estadístico-matemáticas que sirvan como medidores de la fiabilidad de los datos y lo resultados. En muchas ramas de la ciencia se ha aplicado numerosos métodos con resultados probados, en reiteradas ocasiones se da al traste con el planteamiento inicial del objetivo para el cual fue diseñado el objeto de la validación.

Evidencia de ello se constata, por ejemplo, en el uso de los indicadores de desempeño como instrumentos que proporcionan información cuantitativa sobre el desarrollo de una institución o proyecto. Estos indicadores se validan matemáticamente por la necesidad de cumplir el criterio de confiabilidad. Esto se fundamenta sobre la base de la estadística. Al indicador es asignada una fórmula de cálculo que informa sobre los parámetros o variables que se miden. El algoritmo permite efectuarse mediante ratios; se trata de coeficientes o razones que proporcionan unidades de medida y comparación a través de las cuales, la relación por división entre sí de dos datos directos, permite analizar el estado

actual o pasado de una organización, en función de niveles óptimos definidos para ella; se aplican para medir costos medios, producto medio e indicadores de eficiencia (Armijo, 2008).

Dentro de la Gestión del Conocimiento Organizacional, los métodos matemáticos han sido empleados con éxito en indicadores. La perspectiva con la que se usan en este trabajo es innovadora y proporciona un valor agregado al análisis de los datos. Para asegurar el correcto desarrollo de las herramientas matemáticas, los indicadores se incorporan previamente a una base de datos y los resultados se validan a continuación mediante un software reconocido. Los métodos utilizados para ello (Mínimos Cuadrados, Suavizado Exponencial, Bayes y Markov) se fundamentan en estudios probabilísticos (Illescas et al. 2015).

La validación de un sistema de indicadores ha sido efectuada también para la previsión, diseño y medición del impacto sobre el desarrollo local de los proyectos de investigación. Estos objetivos han sido logrados mediante el método Delphi, considerado uno de los métodos subjetivos de pronosticación más confiables, al combinar criterios de análisis de base subjetiva con análisis matemático-estadístico de los resultados (Fernández de Castro & López, 2013).

Se ha desarrollado, además, la validación de un método matemático para el cálculo de indicadores de mantenimiento en una empresa. La información se ha organizado y procesado mediante el programa Microsoft Excel para el cálculo los estadígrafos: media aritmética, desviación media y coeficiente de variación. De igual manera se hizo necesaria una prueba de t-Student para muestras independientes mediante el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.0 para evaluar la diferencia entre las medias (Fernández & Shkiliova, 2012).

En el campo de la Geología no se tiene conocimiento de la realización de trabajos afines con la validación matemática de sistemas de indicadores. No obstante, existen otras ramas de la Geología que realiza trabajos de validación como por ejemplo la validación cruzada a la que son sometidos los datos en un proceso de estimación de recursos y reservas.

1.3 Regularidades de los métodos de validación matemática.

La validación matemática constituye uno de los métodos más efectivos en el desarrollo de los campos de la ciencia. Su autenticidad en cuanto a exactitud y fidelidad de los datos la hacen excepcional para la observación de cuestiones indispensables en el cumplimiento de metas trazadas dentro de empresas e instituciones. En este sentido, el estudio de sistemas de indicadores ha facilitado la objetividad en la validación al cobrar vigencia en los métodos cuantitativos de medición, evaluación y predicción de la información para ponderar su grado de confiabilidad en la toma de decisiones.

Las ventajas que aporta la validación matemática de sistemas de indicadores están determinadas por la elevada calidad en la corrección de los datos, sobre la base de razonamientos matemáticos de probabilidad y estadística al auxiliarse de herramientas como Microsoft Excel y softwares reconocidos, para lo cual se requiere necesariamente del análisis del contenido en una base de datos.

Entre los métodos más utilizados con este fin se destaca el método Delphi, que se identifica por su alto grado de confianza en el pronóstico de la información.

1.4 Características generales del fenómeno licuefacción.

Concepto

La licuefacción se describe como el comportamiento de suelos poco cohesivos que cambian de estado sólido a líquido como resultado de la presión del agua subterránea en los poros, producida, a la vez, por las fuertes y constantes vibraciones de un sismo.

Origen

El elemento disparador de la licuefacción es un sismo de gran magnitud (≥ 5.5 grados en la escala de Richter) con aceleraciones $\geq 0.2 \text{ g/cm}^2$. Debe considerarse, además, la poca profundidad del nivel freático ($< 3 \text{ m}$) con respecto a la superficie; asimismo, la baja compactación del suelo ($N < 10$ para profundidades $< 10 \text{ m}$ y $N < 20$ para profundidades $> 10 \text{ m}$), o sea, la presencia de material suelto. (Obando, 2009).

El fenómeno se produce cuando las continuas e intensas sacudidas causadas por el terremoto provocan el ascenso del agua subterránea hacia la superficie, al ejercer una fuerza superior a la que el suelo puede resistir. La interacción del agua con las partículas sueltas del suelo genera una mezcla no consolidada capaz de fluir, trayendo consigo la inestabilidad del terreno.

Factores

La licuefacción de suelos está condicionada por los factores siguientes:

- *Origen del suelo:* Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se sedimentan fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depósitos glaciales, generalmente, ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.
- *Distribución del tamaño de los granos:* La arena uniformemente graduada, de grano muy grueso a medio tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.
- *Profundidad de las aguas subterráneas:* Mientras más cerca de la superficie se encuentre el nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- *Edad del depósito:* Los suelos jóvenes (menos de 3 000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse comparado con aquellos más antiguos donde han actuado procesos de compactación y cementación natural. Dichos procesos incrementan su resistencia.
- *Amplitud y duración de la vibración del terreno:* La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto aumenta con la magnitud y la duración del sismo. Por esta razón, sismos pequeños licuarán únicamente los suelos más próximos al epicentro, mientras que ante un sismo de magnitud mayor será posible reconocer licuefacción a distancias muy grandes.

- *Peso del recubrimiento y profundidad del suelo:* Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento (a mayor profundidad). Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad de que ocurra licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 9 m y, rara vez, a mayores de 15. (Alfaro, 2013).
- *Densidad:* El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, cuando reduce su volumen de suelo-agua y al incrementar la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando el suelo es compacto, habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción (Ishihara, 1990).

Condiciones para que un suelo sea licuable

Las condiciones para que el suelo sea licuable han sido abordadas por dos autores principales:

Según (Wang, 1979), un suelo es susceptible a la licuefacción si:

- Porcentaje de finos de 0,005 mm <15%.
- Límite líquido, LL <35%.
- Contenido de Humedad Natural > 0,9 LL.
- Índice de liquidez <0,75.
- Forma de las partículas redondeadas.

Seed, B, and Idriss, M. (1982) consideran que un suelo puede licuar si:

- Porcentaje granulométrico en peso de partículas es menor de 0,005 mm <15 %.
- Límite Líquido (LL) < 35 %.
- Humedad Natural (w) $w/LL > 0,9$ %.

A este criterio se le conoció como criterio chino.

Efectos

El fenómeno licuefacción se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la

vibración, lo cual fuerza a que este fluido fluya rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas y forman montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena” (Alfaro, 2013).

En este marco, resulta importante destacar la evidencia de “sismitas”, las cuales constituyen estructuras plegadas que se generan en sedimentos blandos y suelos granulares por la vibración cíclica del terreno al paso de las ondas sísmicas. Pueden estar limitadas por depósitos rocosos en los que no han tenido lugar procesos de deformación sísmica.

La pérdida de cohesión del suelo permite que éste se pueda movilizar, diferenciándose varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

- *Flujos de tierra:* Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causan coladas de barro o avalanchas.
- *Propagación lateral:* Tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como, por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas superficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, esto provoca una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.
- *Flotación:* Objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado ascienden a través del suelo y floten en la superficie.
- *Pérdida de resistencia de soporte:* Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o

colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen (Alfaro, 2013).

Los estragos que acarrea este fenómeno para el hombre son alarmantes (ver figura 1). El impacto de ello se traduce en problemas como: inclinación, arrastre y/o colapso de estructuras, ruptura de tuberías de distribución de agua y gas, desprendimiento de cables eléctricos subterráneos de servicio público y desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y de playa; sin dejar de aludir a la irreparable pérdida de vidas humanas como consecuencia del gran volumen de material licuado que las ha sepultado súbitamente.



Figura 1. Efectos de la licuefacción de los suelos para el hombre.
(<https://concienciaradio.com/liquefaccion/>)

Criterios de susceptibilidad

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción del suelo, la cual puede ser evaluada al usar los criterios siguientes:

- *Criterios históricos:* Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma de paleo-licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad del fenómeno en un determinado lugar.
- *Criterios geológicos:* Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo, los suelos de depósitos fluviales y

eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles a presentar licuefacción. También se ha observado este fenómeno en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los depósitos de suelo jóvenes, pues son más susceptibles a la licuefacción que los casos de los depósitos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los más antiguos.

- *Criterios basados en la composición del suelo:* La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad a la licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad a la licuefacción.
- *Criterios basados en el estado del suelo:* El potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptibles a la licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas (Kramer & Stewart, 2004).

Efecto de sitio como catalizador de licuefacción de suelos

Cuando ocurre un terremoto, las ondas sísmicas se propagan desde el foco o hipocentro en todas las direcciones a través de lo que se denomina el medio de propagación. Este medio está formado por todos los estratos e irregularidades que existen bajo la superficie de la tierra y cuyo efecto sobre la señal se manifiesta en una modificación de su contenido frecuencia y de su amplitud. La señal pierde energía conforme avanza hacia la superficie. Sin embargo, es precisamente cerca de la superficie cuando esta situación se invierte, pues la amplitud tiende a aumentar como resultado de la baja impedancia característica de cuencas

sedimentarias, zonas de relleno y valles aluviales. Los sitios en roca, tales como afloramientos de intrusivos, calizas y lavas no producen una amplificación tan importante como es el caso de materiales menos consolidados, pero cierto nivel de amplificación ha sido detectado en tales ambientes (Steidl et al. 1996). Este fenómeno es conocido como efecto de sitio y modifica el registro sísmico en su contenido frecuencial, amplitud y duración (Moya, 2009). A ello se suma la licuefacción de suelos pobremente consolidados cuando el nivel freático se encuentra cercano a la superficie, puesto que la amplificación de las ondas sísmicas bajo estas condiciones, acelera el movimiento de partículas comprimidas por el agua y provoca la inestabilidad del terreno (ver figura 2).

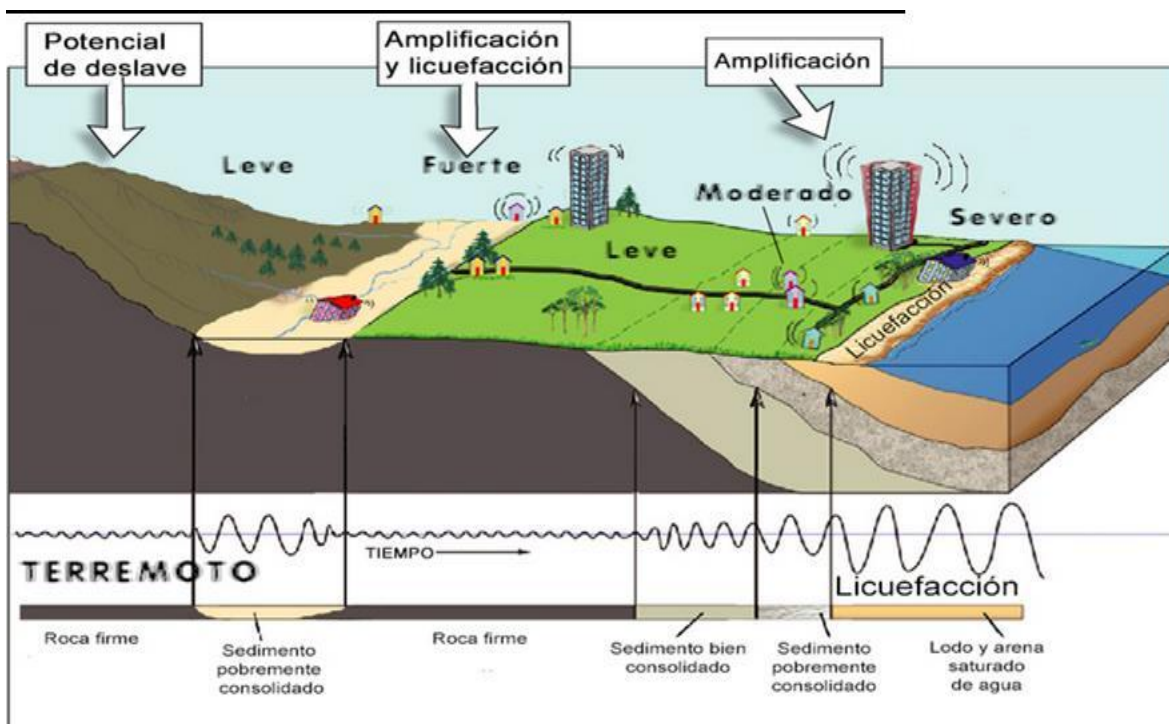


Figura 2. Influencia del efecto de sitio en la licuefacción del suelo.
(<https://concienciaradio.com/category/chiapas/feed/>)

1.5 Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.

Muchos investigadores han desarrollado metodologías para evaluar el riesgo de licuefacción basado en distintos ensayos de suelos, las más utilizadas inicialmente fueron el criterio chino modificado de Wang (1979) y el método de Seed and Idriss

(1982), y más recientemente Youd and Idriss (2001), que recopila la información de las reuniones de NCEER ocurridas en 1996 y 1998.

Alarcón (1989) opina que la aproximación práctica de Seed consiste en comparar las curvas de tensión cíclica provocadas por N ciclos del terremoto de cálculo, con la curva determinada en laboratorio de la tensión cíclica capaz de producir la licuefacción en N ciclos en el terreno en cuestión. De esta comparación es posible extraer la zona peligrosa, aunque para ello ha sido preciso desarrollar criterios que permiten pasar de un movimiento sísmico real a otro equivalente y uniforme.

Luego de los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwán) en 1999, donde ocurrieron significativos daños debidos a licuefacción en lugares donde los métodos disponibles no la predecían, se vio la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de granos finos en el suelo.

Seed (2003) y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley, publicaron un documento que unificaba los resultados de investigaciones recientes acerca del fenómeno licuefacción de suelos. A pesar de que existen nuevas investigaciones, algunas de ellas controversiales, se utiliza la metodología propuesta por Seed et al. (2003), complementada con los estudios de Cetin et al. (2004). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT (Pruebas de Penetración Estándar) normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción (Obando, 2009).

En Estados Unidos, Seed et al. (1983) y Seed & De Alba (1986) han presentado el método simplificado, sobre la base de ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, Tokimatsu & Yoshimi (1981, 1983) e Iwasaki et al. (1978) han presentado también el método simplificado en base a la experiencia japonesa. Estas metodologías simplificadas fueron programadas en lenguaje básico para realizar un análisis sistemático de los datos. La conversión del ensayo de penetración estándar al de cono holandés se realizó según Robertson &

Campanella (1985). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a Liao y Whitman (1986).

En la actualidad los métodos han llegado a ser rutinarios para la investigación del potencial de licuefacción en campo, se pueden mencionar las pruebas de penetración estándar (SPT), la de penetración de cono (CPT), el penetrómetro Becker (BPT), el dilatómetro de Marchetti (DMT) y métodos en los que el potencial de licuefacción se relaciona con la velocidad de onda de corte (V_s).

En nuestro país el trabajo “Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba”, realizado por Fernández (2015) presenta una metodología más global en el marco de análisis del fenómeno, que se fundamenta en la propuesta de un sistema de indicadores para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos, donde se unifican los parámetros propuestos por Seed & Idriss (1971, 1982), Wang (1979), Iwasaki (1982), Bodenbender (1984), Ishihara (1990), Shadanet (1990), Youd & Idriss (2001), González de Vallejo (2002), Kramer & Stewart (2004).

Este sistema brinda un orden lógico de los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable que permite evaluar el fenómeno. De esta manera, se propuso analizar los indicadores siguientes: condiciones geológicas, sismicidad, profundidad del nivel freático y condiciones ingeniero-geológicas; concluyéndose que al cumplirse todos, existen mayores posibilidades para comprobar la alta susceptibilidad de un suelo ante la licuefacción. Entre las deficiencias de esta metodología se encuentra el no contar con un proceso de validación matemático experimental que le diera un peso cuantitativo superior.

1.6 Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.

Los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos pueden dividirse en tres grupos:

A- Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: se apoyan en correlaciones empíricas de algunas características de los suelos,

obtenidas mediante pruebas de campo y/o ensayos simples de laboratorio, con el comportamiento de éstos observado en sismos previos.

B- Métodos simplificado: se basan en la comparación de la resistencia obtenida en ensayos cíclicos de laboratorio con los esfuerzos que provocará el sismo, calculados en forma simplificada.

C- Métodos basados en modelos matemáticos: comprenden a un número creciente de modelos acoplados o desacoplados, para el análisis de la respuesta dinámica y la generación de presión de poros de suelos granulares sujetos a fuerzas sísmicas.

Los métodos del tipo A se basan en el hecho de que la resistencia a la licuefacción y ciertas propiedades determinadas mediante ensayos "in situ" (resistencia a la penetración, velocidad de propagación de ondas de corte, etcétera), varían de la misma forma en función de las características principales de los suelos. Sin embargo, a la fecha sólo se cuenta con una gran cantidad de datos provenientes de pruebas de resistencia a la penetración, especialmente de SPT, mientras que la cantidad de datos que se tiene de las otras propiedades resulta, en algunos casos, insuficiente como para obtener buenas correlaciones a partir de ellos.

A su vez, los métodos B y C requieren para su aplicación, la realización de ensayos de laboratorio sobre muestras "inalteradas". Los procedimientos usados normalmente para extraer este tipo de muestras, producen invariablemente, cambios en su compacidad relativa, en su estructura y en su grado de saturación. Además, los equipos de laboratorio, por lo general, no permiten reproducir adecuadamente las condiciones de esfuerzo y de frontera que tiene el suelo "in-situ". Todos estos factores influyen de manera fundamental sobre la ocurrencia o no del fenómeno de licuefacción.

A causa de lo anterior, parece aconsejable, al menos desde el punto de vista de una aplicación práctica usual, la utilización de los métodos del tipo A. Se presta especial atención a aquellos basados en resultados de ensayos de penetración (SPT y CPT) (ver tabla 1). Dentro de estos métodos, los que son aplicables a obras nuevas están bastante estudiados, y con ellos se han obtenidos resultados

satisfactorios. No existe el mismo nivel de conocimiento en el caso de las aplicaciones a obras ya ejecutadas (Obando, 2009).

Tabla 1. Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción. (Fuente: Instituto de Investigaciones en Salud de la Población).

Evaluación de la resistencia a la licuefacción	Evaluación de los efectos sísmicos	Ejemplos de métodos
	Magnitud (Escala de Richter) y distancia epicentral	Kuribayashi y Tatsuoka (1975) y Wakamatsu (1991)
Geomorfología		Kotoda et al. (1988)
Gradación/ Valor de N-SPT		Standard for regulations of hazardous material for Fire Defense Agency (1978)
Gradación/ Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo	Especificaciones para puentes altos por Japan Road
Gradación/ Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo y Magnitud (Escala de Richter)	Recomendaciones para el diseño de cimentaciones de edificaciones por Architectural Institute of Japan (1988)
Gradación/ Valor de N-SPT	Modelo de esfuerzos totales	Técnicas estándar para puertos (facilidades y comentarios) por Japan Ports and Harbours Association (1989)
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos totales	Seed e Idriss (1967) Ishihara (1976)

Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos efectivos	Finn et al. (1977), et al. (1992)
----------------------------	----------------------------------	-----------------------------------

1.7 Conclusiones.

- La validación matemática de sistemas de indicadores se ha convertido en un método recurrente y necesario para la ciencia, aportándole ventajas que han dado muestra de su alto grado de confiabilidad en la información.
- El estudio de la licuefacción de suelos se ha perfeccionado con el transcurso del tiempo, como resultado de los graves daños que ha causado dentro de la sociedad.
- La validación del sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) para la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos es necesaria para verificar la veracidad de su validez en la delimitación de escenarios susceptibles para la licuefacción de los suelos.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

2.1 Introducción.

Este capítulo expone con detalle las fases de desarrollo de la investigación mediante la realización de las tareas indispensables para el alcance de los resultados esperados. Al mismo tiempo se describen los métodos y materiales utilizados para el logro de los resultados esperados.

2.2 Metodología de trabajo.

La investigación transitó por tres etapas fundamentales, las cuales respondieron de manera positiva al cumplimiento satisfactorio de los objetivos trazados, auxiliándose de herramientas eficaces para ello.

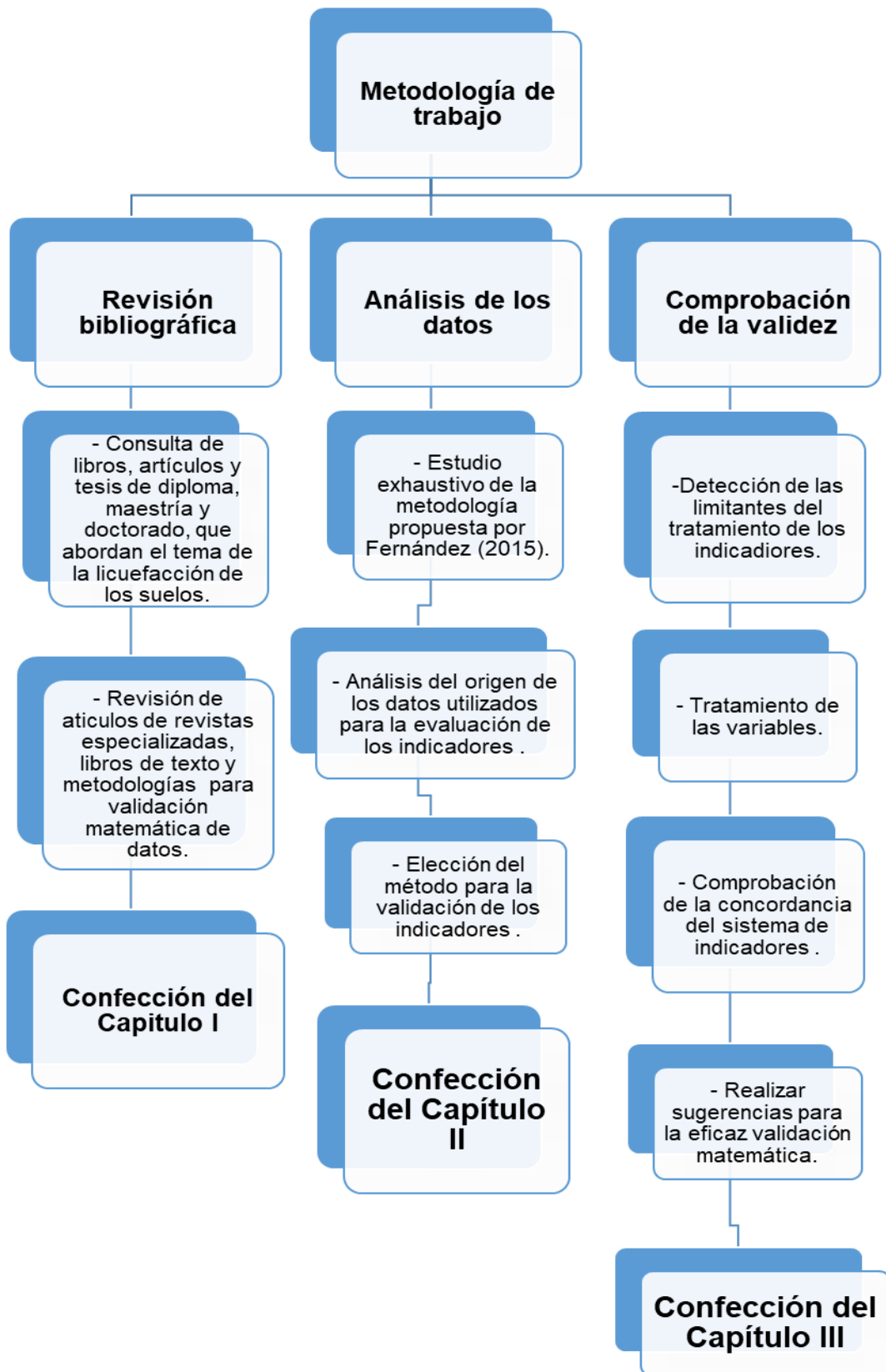
En la primera etapa (revisión bibliográfica) se consultaron variadas fuentes de información relacionadas con el fenómeno licuefacción y la validación matemática de sistemas de indicadores. La primera búsqueda permitió realizar una caracterización exhaustiva de la licuefacción y sus características cuantitativas. La segunda permitió realizar valoraciones eficientes sobre las deficiencias desde el punto de vista matemático que presenta la metodología propuesta por Fernández (2015) y elegir un método que permitiera comprobar la validez de los parámetros establecidos. En esta etapa se consultaron 40 documentos, entre los que se encuentran artículos de revistas especializadas, tesis de diploma, maestría y doctorado y libros de texto realizados sobre ambas temáticas. El resultado de esta etapa fue la elaboración del Marco teórico conceptual (Trabajos de validación matemática de sistemas de indicadores) y el reconocimiento de las características del fenómeno geológico, así como de las diferentes metodologías empleadas para su estudio.

La segunda etapa (análisis de los datos) comprendió el análisis de las bases sobre como Fernández (2015) estableció su sistema de indicadores y el tratamiento realizado por ella a los datos analizados. Esto permitió valorar un conjunto de procedimientos a efectuar para la validación matemática, con ello se verificó la

organización y confiabilidad de los datos. El resultado de esta etapa fue la declaración del método matemático a emplear para comprobar la validez del sistema de indicadores.

En la tercera etapa (comprobación de la validez) se concretó el propósito fundamental de la investigación, puesto que, a partir de toda la información analizada, se logró verificar la validez matemática del sistema de indicadores que condicionan la licuefacción de suelos, en función de la aplicación del método seleccionado. De igual forma se propuso una metodología para lograr un proceso de validación eficaz.

El siguiente flujograma muestra las diferentes etapas de desarrollo de los trabajos con sus diferentes tareas.



2.3 Materiales.

El material utilizado para la elaboración de este trabajo es la tesis de maestría de Fernández (2015) titulada “Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba”. En su investigación, la autora propone un sistema de indicadores para evaluar el potencial licuable de los suelos sobre la base de 4 indicadores que, a su consideración, son los más representativos de la realidad del fenómeno en estudio, a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva de las consideraciones metodológicas que sobre el tema han realizado varios autores en la arena internacional. Esta metodología no ha sido sometida a un proceso de validación que consolide su utilidad para el fin con que fue diseñada. A pesar de esto ha sido puesta en práctica en 11 tesis de grado encaminadas a evaluar el potencial licuable de los suelos en diferentes partes del oriente cubano.

2.4 Método de validación aplicado (Coeficiente de Kendall).

Generalidades

El coeficiente de Kendall es una de las técnicas no paramétricas para medir el grado de correlación entre las variables de una muestra, a partir de la asociación entre varios conjuntos de rangos (k) de N entidades.

En la prueba estadística, el coeficiente de concordancia de Kendall (W) ofrece el valor que posibilita decidir el nivel de concordancia entre los expertos. El valor de W oscila entre 0 y 1, donde 1 significa una concordancia de acuerdos total y el valor 0 un desacuerdo total. La tendencia a 1 es lo deseado, ello permite realizar nuevas rondas si en la primera no es alcanzada significación en la concordancia.

Fórmula:

En el cálculo del coeficiente de Kendall se puede utilizar dos fórmulas, en dependencia de si existe o no ligas entre los datos (es decir, puntuaciones repetidas).

Ecuación (1) No existe liga en las observaciones.

$$W = \frac{s}{\frac{1}{12}k^2(N^3 - N)}, \text{ donde:}$$

W : Coeficiente de concordancia.

S : Suma de los cuadrados de las desviaciones observadas de la media de R_j

(Suma de los rangos asignados a cada variable), esto es, $S = \sum \left(R_j - \frac{\sum R_j}{N} \right)^2$.

N : Número de conjunto de rangos, es decir, número de jueces o expertos.

k : Número de entidades (objetos, individuos) ordenados.

$\frac{1}{12}k^2(N^3 - N)$: Máxima suma posible de las desviaciones cuadradas, es decir, la suma s que ocurrirá al darse un perfecto acuerdo entre las k ordenaciones.

Ecuación (2). Existe liga en las observaciones.

$$W = \frac{s}{\frac{1}{12}k^2(N^3 - N) - k \sum_T T}, \text{ donde además de los parámetros planteados se}$$

adiciona $T = \frac{\sum (t^3 - t)}{12}$, donde:

t : Número de observaciones en un grupo ligado por un rango dado.

\sum : indica sumar todos los grupos de liga dentro de cualquiera de las ordenaciones k .

Prueba de la significación de W:

➤ *Muestras pequeñas*

Se puede observar la significación de un valor observado de W al determinar la probabilidad asociada con la ocurrencia conforme a H_0 de un valor tan grande como la s con la que está asociado. Si se obtiene la distribución muestral de s para todas las permutaciones de los N rangos de todas las k maneras posibles, se

determinará $(N!)^k$ conjuntos de posibles rangos. Con ellos, se puede probar la hipótesis de nulidad de que los N conjuntos de rangos son independientes, por medio de la probabilidad, tomada de esta distribución asociada con la ocurrencia conforme a la hipótesis nula (H_0) de un valor tan grande como el de una s observada. Mediante este método, la distribución de s conforme a H_0 se ha obtenido y se han tabulado ciertos valores críticos para los cuales existe una tabla que asocia valores de s para niveles de significación de W en los niveles 0.05 y 0.01.

➤ *Muestras grandes*

Cuando $N > 7$, la expresión $\chi^2 = \frac{s}{\frac{1}{12}N(N+1)}$ está aproximadamente distribuida

como Chi cuadrada con $df = N - 1$. Esto es, la probabilidad asociada con la ocurrencia conforme a H_0 de cualquier valor tan grande como el de una W observada, puede determinarse al obtener χ^2 con la fórmula y determinar la probabilidad asociada con un valor tan grande de χ^2 en la tabla.

Si el valor de χ^2 calculado con la fórmula $\chi^2 = \frac{s}{\frac{1}{12}N(N+1)}$ iguala o excede el

mostrado en la tabla en un nivel de significación particular y para un valor particular de $df = N - 1$, la hipótesis de nulidad de que las N ordenaciones no están relacionadas puede rechazarse en ese nivel de significación.

Procedimiento:

- 1) Sea k =número de entidades que van a ordenarse y N =número de jueces que asignarán los rangos. Ordénense los rangos observados en una tabla $N \times k$.
- 2) Para cada entidad, se determina R_j (suma de los rangos asignados a esa entidad por los N jueces).
- 3) Se determina la media de las R_j . Se expresa cada R_j como una desviación de la media. Estas desviaciones se elevan al cuadrado y los cuadrados se suman para obtener s .

- 4) Si la proporción de ligas de los N conjunto de rangos es grande, se usa la Ecuación 2 para calcular el valor de W . Si no es el caso, se utiliza la Ecuación 1.
- 5) El método para determinar si el valor observado de W es significativamente diferente de 0 depende del tamaño de N :
- Si $N \leq 7$, la tabla R contiene los valores críticos de s , asociados con la significación de W en los niveles 0.05 y 0.01.
 - Si $N > 7$, las ecuaciones $\chi^2 = \frac{s}{\frac{1}{12}N(N+1)}$ o $\chi^2 = N(k-1)W$ -la segunda es más fácil-pueden usarse para calcular un valor de χ^2 , cuya significación, para $df = N - 1$, puede probarse con la tabla de valores prefijados.

Interpretación de W

Un valor alto o significativo de W puede interpretarse como la aplicación de parte de las observaciones o jueces, o, de modo esencial, la misma norma para ordenar los N objetos en estudio. Frecuentemente su conjunto de observaciones puede servir como norma, especialmente cuando no existe un criterio externo relevante para ordenar los objetos.

Vale destacar que un valor alto o significativo de W no implica que las ordenaciones observadas sean correctas. En efecto, todas pueden ser incorrectas con respecto a algún criterio externo. Un alto grado de acuerdo acerca de un orden no significa necesariamente que el orden escogido es el objetivo.

Kendall (1948) sugiere que la estimación mejor de la ordenación verdadera es proporcionada, cuando W es significativa, por el orden de las diversas sumas de rangos (R). Si se acepta el criterio de que los diversos jueces han coincidido (comprobado por la magnitud y significación de W) en la ordenación de las N entidades, la mejor estimación del orden verdadero de las entidades, de acuerdo con este criterio, es suministrado por el orden de las sumas de rangos. Esta estimación mejor está asociada, en cierto sentido, con el cuadrado mínimo.

Ventajas

- Es generalizable a un coeficiente de correlación parcial.
- Tiene una distribución normal para tamaños de muestras tan pequeños como 9.
- Permite evaluar acuerdos entre múltiples jueces en pruebas de catación o juicios de expertos.

Aplicaciones

Uno de los coeficientes de asociación lineal más empleados en las investigaciones científicas corresponde al coeficiente de Kendall. La aplicación de este método es muy amplia, de modo que puede ponerse en práctica en cualquier campo de las ciencias para la creación de un modelo que responda a la ordenación de entidades de acuerdo a un consenso, cuando no existe un orden objetivo de ello.

Prácticamente, todas las titulaciones de Ciencias Sociales tratan el tema de la correlación, por lo que los investigadores de la mayoría de disciplinas están sobradamente familiarizados con el concepto. Los diseños de análisis de varianza factoriales (pocos factores y vigilancia extrema de la interacción) son muy típicos, por ejemplo, de la biología y ciencias afines, en cambio, estos diseños (también ANOVA, pero con muchas variables) son más frecuentes en otros campos como la psicología. De este modo, el desarrollo conceptual de la W de Kendall, a partir de la idea de correlación es fácilmente asumible por la comunidad de investigadores ajenos a un proyecto (Badia, 2012).

Un estudio de estratificación de variables cuantitativas ha desarrollado, por ejemplo, una metodología que combina algoritmos exploratorios e iterativos sobre la base del concepto de concordancia del coeficiente de correlación de Kendall. A partir de conjuntos complejos de ítems y sus puntuaciones (actividades de evaluación, problemas, prácticas, indicadores de rendimiento, mediciones y, en general, variable cuantitativa), se consigue identificar conjuntos concordantes, es decir, estructuras explicativas de la dificultad del conjunto de ítems (Badia, 2012).

Una de las estrategias puestas en juego en el Laboratorio de Aplicaciones Informáticas en Educación de la Universidad Autónoma de Barcelona fue la

detección de conjuntos concordantes mediante la iteración de pruebas W de Kendall. La idea metodológica consistió en usar el coeficiente enfocado a detectar subconjuntos de ítems para los cuales los jueces fueran homogéneos. Mediante un algoritmo simple iterativo se pudo detectar, a partir del conjunto de ítems dado, un subconjunto para la garantía de que una prueba W de Kendall diera un resultado mayor que una $W=0$ fijada de antemano. El conjunto se denominó “concordante” porque alcanzó el nivel exigido de concordancia entre los jueces (Badia, 2012).

En un sistema empresarial se ha empleado el coeficiente de Kendall con el objetivo de hallar la concordancia entre los trabajadores para la determinación de la dimensión del comportamiento informacional considerado más importante. Para ello, se utilizó el software profesional SPSS. El coeficiente se calculó con un 95% de confiabilidad, para comprobar las hipótesis siguientes: hay concordancia entre los trabajadores (H_1) o no hay concordancia entre los trabajadores (H_0) (Alcaina, 2017).

Para la determinación del coeficiente de Kendall se empleó el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25, que es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y aplicadas, así como en las empresas de investigación de mercado. Constituye uno de los programas estadísticos más conocidos por su capacidad para trabajar con bases de datos y una sencilla interfaz para la mayoría de los análisis.

2.5 Conclusiones.

- El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) requiere la aplicación de un método matemático para demostrar su validez.
- El coeficiente de Kendall constituye un método con elevado nivel de fidelidad para comprobar la validez de los datos.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1 Introducción.

En este capítulo se analiza con mayor precisión el sistema de indicadores que condicionan la licuefacción de suelos, sobre la base de los aspectos que se tuvieron en cuenta para conformarlo y ponerlo en práctica en el estudio de un área determinada; ello constituye el pretexto para aplicar, posteriormente, el método de validación matemática al sistema.

3.2 Establecimiento de los indicadores.

Un indicador es un dato o información que sirve para conocer o valorar las características o la intensidad de un hecho y determinar su evolución futura. La finalidad de un indicador es, en primer lugar tomar decisiones, pues los indicadores deben ser capaces de controlar un proceso, evento o fenómeno lo cual nos permite plantear acciones para su mejora y mitigación.

Los indicadores se pueden clasificar según su medición en:

- ❖ **Cuantitativos:** son la representación numérica de un proceso, evento o fenómeno que se analiza, es decir, una medida de cantidad. Ofrece respuesta a preguntas como: cuánto, cada cuánto o con qué frecuencia.
- ❖ **Cualitativos:** no ofrecen una medida numérica como tal, sino que con ellos se consigue demostrar, describir o medir algo que ha sucedido. Por lo general están basadas en encuestas, entrevistas o percepciones orientadas a responder preguntas de cuándo, quién, dónde, qué, cómo y por qué.

Un indicador debe cumplir además con atributos como:

- ❖ Tener los datos disponibles.
- ❖ Ser utilizable por cualquier persona en cualquier momento.
- ❖ Permanecer en el tiempo.
- ❖ Contar con información veraz.
- ❖ Tener relación con lo que se mide.

- ❖ Expresarse en una fórmula numérica.
- ❖ Ser adecuado para tomar decisiones.
- ❖ Ser comparable con períodos anteriores.
- ❖ Servir de control.
- ❖ Ser el más conveniente.

Un sistema de indicadores, por su parte, es la relación entre variables que permiten observar aspectos de una situación y sus proyecciones. En la definición de los sistemas juega un papel fundamental el grado de correlación que puedan tener los indicadores entre sí, lo cual puede estar influenciado por el origen de los datos por que se regirá la evaluación de cada indicador. Se impone entonces en la validación de los sistemas de indicadores establecer el origen de los datos y grado de concordancia entre los componentes del sistema.

3.3 Origen de los datos.

El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) fue el resultado de una revisión bibliográfica tradicional exhaustiva de las publicaciones realizadas sobre la temática de la licuefacción de los suelos. La autora propone 4 indicadores que, a su consideración, son comunes en los criterios de todos los autores consultados y le asigna valores en una escala de 0-3, donde se considera: 0-No lo tiene en cuenta, 1-Bajo, 2-Medio, 3-Alto (ver tabla 2).

La principal limitación de las revisiones tradicionales viene dada por la subjetividad del revisor para determinar tanto los estudios seleccionados como la importancia relativa con la que se valoran sus resultados. Tras una búsqueda más o menos exhaustiva de los trabajos sobre el tema de interés, cada investigador suele aportar su particular visión global o síntesis de la cuestión, muy probablemente influenciado por aquellos autores y/o trabajos que le parezcan más relevantes o cercanos a su propia posición teórica. En consecuencia, el resultado de una revisión tradicional va a estar sesgado por la experiencia y perspicacia del investigador, sus opiniones personales, preferencias, creencias previas y el estilo personal con el que aborde la revisión.

Tabla 2. Análisis de los criterios de los autores consultados y valores asignados.

Autores	Indicadores	Valoraciones	Puntuaciones
Seed & Idriss (1971, 1982)	Condiciones geológicas	Tipo de suelo	2 (Media)
	Profundidad del nivel freático	Presión del agua en los poros	3 (Alta)
	Sismicidad	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas sísmicas	3 (Alta)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Composición del suelo, % de finos, LL y resistencia del suelo	3 (Alta)
Wang (1979)	Condiciones geológicas	Tipo de suelo	1 (Baja)
	Profundidad del nivel freático	No lo tiene en cuenta	0
	Sismicidad	No lo tiene en cuenta	0
	Condiciones ingeniero-geológicas	% finos, LL, IL, forma de las partículas	3 (Alta)
Iwasaki (1982)	Condiciones geológicas	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)
	Profundidad del nivel freático	Proximidad del agua subterránea a la superficie	3 (Alta)
	Sismicidad	Estado del suelo después del sismo	1 (Baja)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Composición del suelo	1 (Baja)
Bodenbender (1984)	Condiciones geológicas	Tipo de suelo	2 (Media)
	Profundidad del nivel freático	Proximidad del agua subterránea a la superficie	3 (Alta)
	Sismicidad	Magnitud, intensidad y epicentro	2 (Media)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Forma de las partículas	1 (Baja)
Ishihara (1990)	Condiciones geológicas	Edad del depósito y origen del suelo	3 (Alta)
	Profundidad del nivel freático	Incremento de la presión intersticial	3 (Alta)
	Sismicidad	Amplitud y duración de la vibración del terreno	3 (Alta)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Distribución del tamaño de los granos, densidad y profundidad del suelo	2 (Media)
Shadanet (1990)	Condiciones geológicas	Edad y origen del depósito	3 (Alta)
	Profundidad del nivel freático	Proximidad del agua subterránea a la superficie	3 (Alta)
	Sismicidad	Amplitud y duración de la vibración del terreno	3 (Alta)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Tamaño de granos, densidad del suelo y profundidad de la capa	2 (Media)
Youd & Idriss (2001)	Condiciones geológicas	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)
	Profundidad del nivel freático	Presión del agua en los poros	3 (Alta)
	Sismicidad	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas sísmicas	3 (Alta)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Composición del suelo, LL, % finos y tamaño de las partículas	3 (Alta)
González de Vallejo (2002)	Condiciones geológicas	Tipo de suelo	2 (Media)
	Profundidad del nivel freático	Presiones intersticiales	3 (Alta)
	Sismicidad	Magnitud del sismo y aceleración de las ondas sísmicas	3 (Alta)
	Condiciones ingeniero-geológicas	Composición y compactación del suelo, % de finos, Coeficiente uniformidad de la arena (Cu)	2 (Media)
Krammer & Stewart (2004)	Condiciones geológicas	Edad del depósito y tipo de suelo	3 (Alta)
	Profundidad del nivel freático	Saturación de agua en los suelos	3 (Alta)
	Sismicidad	No lo tiene en cuenta	0
	Condiciones ingeniero-geológicas	% de finos, composición del suelo y estado del suelo	2 (Media)

Los indicadores (que a la vez son factores que favorecen la licuefacción) establecidos luego, son cuantitativos y representan características medibles (variables) del fenómeno en estudio. Son ellos:

- ❖ Condiciones geológicas.
- ❖ Sismicidad.
- ❖ Profundidad del nivel freático.
- ❖ Condiciones ingeniero- geológicas.

3.4 Limitaciones de sistema de indicadores.

Una de las principales limitaciones del sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) es la subjetividad a la hora de seleccionar y dar valor a los criterios de los autores consultados. Estos procesos de valoración que deben caracterizarse por la autenticidad y la confrontación de criterios, podrían realizarse al utilizar elementos del metaanálisis o la consulta de expertos mediante el método Delphi. El nivel de concordancia entre los indicadores seleccionados se valorará posteriormente al aplicar el método de concordancia de Kendall.

Otro elemento a tener en consideración es que los indicadores dependen de variables medibles que deben cumplir con ciertas características para ser medidas (ver tabla 3) y en cuyo proceso interviene un aspecto importante de toda experimentación denominado representatividad de la muestra, el cual puede ser una limitante en la delimitación de los suelos susceptibles a la licuefacción si el investigador no delimita correctamente el área de los trabajos. Por su importancia dedicamos un epígrafe a éste en particular.

Tabla 3. Descripción del sistema de indicadores.

Indicador	Variables	Parámetros	Observaciones
Condiciones geológicas	Edad	$\leq 10\ 000$ años	Formaciones del Cuaternario (Holoceno).
	Razón entre el estrato licuable (a) y el no licuable (b)	$a/b \leq 1$	
	Espesor del estrato licuable	< 8 m	
	Tipo de suelo		Suelos arenosos y areno-limosos principalmete.
Sismicidad	Magnitud en la Escala de Richter	$\geq 5,5$ grados	Cálculos de la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR) y del Factor de Escala (MSF) según la magnitud del sismo, zonas sismogeneratoras y microzonación sísmica.
	Aceleración de las ondas sísmicas	$\geq 2,2$ g/cm	
Nivel freático	Profundidad	≤ 3	Permeabilidad y saturación del suelo. Depósitos aluviales, lacustres y palustres.
Condiciones ingeniero-geológicas	Porcentaje de partículas finas	≤ 15	Perforaciones, técnicas para medición de la resistividad del terreno y cálculo de la Relación de Resistencia Cíclica (CRR).
	Límite Líquido (LL)	≤ 35 %	
	Contenido Natural de agua	$> 0,9$ LL	
	Índice de liquidez	$< 0,75$	
	N de SPT	< 20 golpes	
	Compacidad relativa (Cr)	< 75 %	
	Coefficiente de uniformidad de la arena (Cu)	< 5	
	Forma de las partículas		Principalmente redondeadas.
Composición del suelo		Arena fina, media, limosa, con partículas y con bajo % de materia orgánica. Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.	

Lo cierto es que el sistema de indicadores sirvió de punto de partida para la realización de investigaciones posteriores que asumieron su autenticidad en la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos; por lo que se asume que cada indicador permite estudiar minuciosamente en el área de estudio las características esenciales del suelo que dan paso a su susceptibilidad de éste ante los efectos que desencadena el evento catastrófico.

En el desarrollo de las investigaciones mencionadas se han tenido en cuenta los estudios ingeniero- geológicos originados de la ejecución de obras ingenieriles por parte de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en los diferentes territorios. Algunos trabajos se apoyan en análisis geofísicos mediante la técnica de resistividad del terreno, para lo cual han empleado: telurómetros Chauvin-Anaux, teracontrolo V' , ecuación de Vaumer–Holt, los esquemas de mediciones de Vaumer y Cager y las Normas Cubanas y el reglamento electrónico de baja tensión.

Es necesario destacar que, a pesar de la eficiencia de los trabajos de perforación y el correcto procesamiento de las muestras, muchos de los informes analizados presentan imprecisiones, dado que son netamente geotécnicos; entre estas dificultades se pueden señalar las siguientes:

- En algunas obras no se realizaron ensayos de importancia, tales como: ensayo de humedad, peso específico, límite líquido y límite plástico.
- Existe bajo grado de estudio en cuanto a la sismicidad del área, pues solo se menciona de forma regional.

3.5 Representatividad de la muestra en la aplicación del sistema de indicadores.

La característica más trascendente de una muestra es la representatividad. Una muestra representativa es una pequeña porción de un conjunto de individuos o elementos que cumplen ciertas propiedades comunes denominado población o universo. Es significativo resaltar que la representatividad de la muestra no depende de su tamaño, es decir, de la cantidad de elementos que la forman (aunque sí influye), sino de la forma en que fue seleccionada; en el ámbito de la

Estadística, el proceso de selección de la muestra se conoce como muestreo y consiste en determinar –mediante parámetros científicos- cuál es la parte precisa de una población que debe escogerse para su estudio, esto tiene como finalidad inferir, sobre la base de los comportamientos o rasgos de dicho grupo, las tendencias generales del total de esa población.

Existen diferentes tipos de muestreos que se agrupan de dos maneras: probabilísticos y no probabilísticos.

Los muestreos no probabilísticos son aquellos en que los elementos de la población no tienen la misma posibilidad de estar incluida en la muestra, tienen gran aplicación en estudios sociales, psicológicos, económicos y estudios de mercados. En este tipo de muestreo el investigador debe tener conocimientos sobre la población, conoce donde se encuentran los individuos o elementos que son de su interés y por tanto, va directamente a tomar su muestra directamente de estos individuos; mientras que en los probabilísticos todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de estar incluidos en la muestra, el investigador no necesariamente tiene acceso a toda la población, estos muestreos son más complejos que los no probabilísticos.

El muestreo cobra todo su sentido en tanto que garantiza que las características que se quieren observar en la población quedan expresadas apropiadamente en la muestra. De manera que generalizar a la población desde la muestra solamente está justificado si ésta representa realmente a la población. Preservar la representatividad es el atributo más importante que debe reunir el muestreo (La Torre et al. 2003).

Otra perspectiva sobre el tema es de Fox (1990), quien señala que para lograr la representatividad se requiere conocer qué características (variables) están relacionadas con el problema que se estudia y la capacidad para medir esas variables, así como poseer datos de la población sobre estas características o variables para usarlos como variable de comparación. El mismo autor señala que si no se cumple alguna de estas condiciones, para algunas de las características,

se pierde la capacidad de buscar deliberadamente la representatividad en cuanto a ella.

El tamaño de la muestra va estrechamente unido con la representatividad. Determinar el tamaño de la muestra es un tema complejo. Por tanto, se debe tener en cuenta: la amplitud del universo (infinito o no), las variables (tipo de datos, valores de éstas, homogeneidad/variabilidad de los datos), el tipo de muestreo, el proceso y medios de recogida de datos, los análisis estadísticos que se planifiquen, el error muestral, el error de estimación y el nivel de confianza con el que desee trabajar. Con esta base se tendrán los referentes necesarios para determinar el tamaño de la muestra.

En una investigación no existe un tamaño ideal de la muestra, pero es importante destacar que cuanto más homogénea es una población en las características objeto de estudio, más fácil resulta conseguir muestras representativas sin necesidad de que sean grandes. Es decir, el tamaño de la muestra está en relación directa con la desviación típica de las puntuaciones en las características de la variable a estudiar.

Según Fernández (1983) el tipo de datos que se desea recoger y el medio que para ello se va a emplear son condicionantes que influyen en la menor o mayor reducción de la muestra seleccionada.

En lo referente a la finalidad del nivel de confianza que se quiera alcanzar con los resultados también influye el tamaño que se deba dar a la muestra. En este marco, otro dato determinante es el error de estimación. Es lógico pensar que no haya una coincidencia total entre los datos de la población y los de la muestra, pero si se quiere rebajar ese error es necesario aumentar el volumen de la muestra.

En el caso del sistema de indicadores en análisis la representatividad de la muestra se ve afectada por el hecho de que la ENIA no hace estudios en la totalidad del territorio que se evalúa, por lo que de inmediato el indicador "Condiciones Ingeniero geológicas" se vería afectado al ausentarse las tan importantes pruebas. Al mismo tiempo impediría la posibilidad de acceder a

estudios de toda la población en estudio, es decir, toda el área, pues solo se tendrían muestras de los lugares con obras ejecutadas y no sus alrededores. Se tendría entonces que definir el tipo de muestreo a aplicar, su objetivo y su representatividad.

El muestreo para el estudio de la licuefacción debe ser declarado como un muestro no probabilístico intencional, resultado de la discriminación realizada en el primer indicador denominado “Condiciones geológicas” de donde se seleccionaron previamente lo terrenos cuaternarios que cumplían con el tipo de suelo definido. De igual forma debe delimitarse exhaustivamente el área de los estudios a partir de los sectores de ésta, donde se cuenta con muestras de ensayos de las condiciones ingeniero geológicas realizados por la ENIA. De no tenerse en cuenta estas cuestiones, se contemplaría una serie de errores en el proceso de generalizar los resultados al resto del área.

3.6 Comprobación de la validez de los indicadores.

La comprobación de la validez de los juicios emitidos por expertos es un paso esencial para la confiabilidad en el establecimiento de un indicador o de un sistema de indicadores. Los niveles de concordancia entre expertos se miden a través del coeficiente de Kendall y, aunque el establecimiento del criterio de los expertos en este sistema de indicadores fue realizado por la valoración de su autora y no por un sistema de encuestas, consideramos procedente aplicar dicho método en la determinación de efectividad de la elección.

En la aplicación de dicho método se tuvo en cuenta el procedimiento expuesto en el Capítulo II con el empleo del software SPSS Statistics Viewer. Versión 25.

Primeramente se confeccionó una tabla $k \times N$ donde k ($=4$) representa número de indicadores pertenecientes al sistema y N ($=9$) el número de autores consultado, y donde además, se le asignó a cada indicador un rango de puntuaciones sobre la escala explicada anteriormente (ver tabla 4). Esta tabla fue introducida al software para su procesamiento estadístico (ver figura 3).

Tabla 4. Tabla de puntuaciones.

Autores	Condiciones geológicas	Profundidad del nivel freático	Sismicidad	Condiciones ingeniero-geológicas
Seed & Idriss (1971, 1982)	2	3	3	3
Wang (1979)	1	0	0	3
Iwasaki (1982)	3	3	1	1
Bodenbender (1984)	2	3	2	1
Ishihara (1990)	3	3	3	2
Shadanet (1990)	3	3	3	2
Youd & Idriss (2001)	3	3	3	3
González de Vallejo (2002)	2	3	3	2
Krammer & Stewart (2004)	3	3	0	2

Figura 3. Introducción de los datos en el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25.

Una vez introducidos los datos en el software, se aplicó el procedimiento para el coeficiente de concordancia de Kendall. Se obtuvo un orden de rangos para el establecimiento de la jerarquización de los parámetros que señala como indicador más importante al Nivel freático con un rango medio de 3.06, seguido de las Condiciones geológicas con 2.6, la Sismicidad con 2.39 y las Condiciones ingeniero-geológicas con 1.94. De igual forma, se obtuvo el coeficiente de correlación de Kendall con un valor de 0.189, el cual, al estar por debajo de 0.5, se considera bajo y por tanto no hay concordancia en las puntuaciones asignadas a los criterios de los expertos respecto a cada indicador (ver figura 4).

Kendall's W Test

Ranks	
	Mean Rank
Que valor le da a la Geología?	2.61
Que valor le da a la profundidad del nivel freático?	3.06
Que valor le da a la sismicidad?	2.39
Que valor le da a las condiciones ingeniero geológicas?	1.94

Test Statistics

N	9
Kendall's W ^a	.189
Chi-Square	5.115
df	3
Asymp. Sig.	.164

a. Kendall's
Coefficient of
Concordance

Figura 4. Resultados del cálculo del coeficiente de concordancia de Kendall en el software SPSS Statistics Viewer. Versión 25.

Para comprobar la veracidad del coeficiente encontrado se realizó la prueba de hipótesis siguiente:

1) Hipótesis planteada:

H_0 : Los criterios de los jueces según las puntuaciones asignadas no son concordantes.

H_1 : Los criterios de los jueces según las puntuaciones asignadas sí son concordantes.

2) Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

3) Punto crítico

$$\chi^2_{(\alpha; k-1)} = \chi^2_{(0.05; 4-1)} = \chi^2_{(0.05; 3)} = 7.8147$$

4) Valor observado

$$\chi^2_{obs} = 5.115$$

5) Criterio de decisión

$$\chi^2_{obs} > \chi^2_{tabulado} \rightarrow 5.115 < 7.8147$$

6) Conclusiones

Como no se cumple el criterio de rechazo de H_0 se toma H_0 como válida y se rechaza H_1 . Por lo tanto con una confiabilidad del 95% se puede afirmar que no existe concordancia entre las puntuaciones asignadas al criterio de los autores para un nivel de significación de 0.05.

3.7 Sugerencias para mejorar la validación.

El bajo valor de W (0.189) puede interpretarse como la falta de concordancia entre los criterios o pesos que la autora designa según su valoración propia a los criterios de los autores consultados. Esto no debe verse como la falta de correlación entre los indicadores, sino como la necesidad de la valoración de los indicadores por parte de expertos “vivos” con elevado conocimiento y experiencia sobre la temática tratada a través de una encuesta validada que se analice mediante el método Delphi.

Redefinir las características de los indicadores sería útil para el logro de una mejor escala de medición, al tener en cuenta que los atributos que deben tener los indicadores expuestos en epígrafe anterior. Una vez hecho esto, se puede validar cada indicador antes de ser integrado al sistema a partir de los pasos siguientes:

1. Definir sus objetivos.
2. Identificar los factores de la licuefacción.
3. Definir los indicadores en función de los factores claves de la licuefacción.
4. Analizar su rango de gestión.
5. Planificar su medición.
6. Asignar los recursos necesarios para medir.
7. Tomar sus datos.

8. Validar el indicador.
9. Mantener en uso el indicador.

En función de estas consideraciones se podría utilizar la tabla siguiente:

Tabla 5. Ficha de medición de cada indicador.

Nombre del indicador	Origen de los datos	Expresión matemática
Unidad de medida	Umbral	Tendencia de los datos
Frecuencia de recolección de los datos	Responsable	Valores deseados

La última consideración radica en el hecho de la correspondencia entre el área de estudio para la que se define el potencial licuable de los suelos y la representatividad de la muestra. No se deben hacer consideraciones de un área en general si se carecen de datos para evaluar los indicadores. Se debe, además, definir el tipo de muestreo, sus objetivos y el método de estimación que permitirá extender los resultados al resto del área.

3.8 Conclusiones

- El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) presenta elementos que dificultan su validación matemática.
- No existe concordancia entre las puntuaciones asignadas al criterio de los autores por Fernández (2015), según el coeficiente de concordancia de Kendall.
- Se han de implementar las sugerencias realizadas para la eficaz validación del sistema de indicadores.

CONCLUSIONES

1. El sistema de indicadores propuesto por Fernández (2015) no cuenta con un proceso matemático de validación para consolidar su utilidad según el fin con que fue diseñado.
2. La aplicación del coeficiente de Kendall demostró la no concordancia entre los criterios asignados a los autores por parte de Fernández (2015) para un valor=0,189.
3. Se sugiere tener en cuenta, para el consecuente logro de la validación efectiva del sistema de indicadores, el método Delphi, la redefinición de las características de los indicadores apoyada en una ficha de medición de éstos, así como la correspondencia entre el área de estudio y la representatividad de la muestra.

RECOMENDACIONES

1. Definir los indicadores centrado en los pocos vitales y no en los muchos triviales de forma que éstos sean sencillos, objetivos y de fácil manejo.
2. Garantizar que el sistema de indicadores sea un sistema de alerta temprana y no de historia.
3. Establecer los indicadores mediante la realización de un metaanálisis que permita una revisión sistemática con análisis estadístico de los resultados cuantitativos.
4. Encontrar un método de estimación que permita, según las características de los datos, estimar las áreas donde no se tiene muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- ALARCÓN, E. (1989). Respuesta dinámica de suelos. Revista Física de la tierra, vol. 1, pp. 309-356. ISSN 0214-4557.
- ALCAINA HERNÁNDEZ, E (2017). Estudio del comportamiento informacional en el sistema empresarial cienfueguero. Tesis de diploma en Ciencias de la Información. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ALFARO VILLAGRAN, F. A. (2013). Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción. Tesis de Ingeniería Civil. Universidad del Bio Bio. Concepción.
- ARMIJO, M. (2008). Lineamientos metodológicos para la construcción de indicadores de desempeño. Santiago de Chile, Chile: ILPES-CEPAL.
- BADIA FOLGUERA, D. (2012). Metodología de los mapas de concordancia para la estratificación de variables cuantitativas: aplicación a la asignatura de medidas electrónicas. Tesis Doctoral. Universidad Ramón Llull.
- BODENBENDER, G. (1894). El terremoto argentino del 27 de octubre de 1894. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba, tomo XIV, pp. 293-329
- CARNELLI, G; FALSETTI, M; FORMICA, A. Y RODRÍGUEZ, M. (2008). Un estudio del aprendizaje de validación matemática a nivel pre-universitario en relación con distintas interacciones en el aula. Revista SUMA, n. 58, pp. 25-40.
- CETIN, K.O. et al. (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 130, n. 12, ISSN 1314-1340.

- FERNÁNDEZ DIÉGUEZ, L. (2015). Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. Tesis de Maestría en Ingeniería Geológica. ISMMM
- FERNÁNDEZ DE CASTRO FABRÉ, A. Y LÓPEZ PADRÓN, A. (2014). Validación mediante criterio de usuarios del sistema de indicadores para prever, diseñar y medir el impacto en los proyectos de investigación del sector agropecuario. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, n. 3, pp. 77-82, ISSN 2071-0054.
- FERNANDEZ SANCHEZ, M. Y SHKILIOVA, L. (2012). Validación de un método para el cálculo de indicadores de mantenimiento. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21, n. 4, pp. 72-79, ISSN 2071-0054.
- FOX, J. (1990). Describing univariate distributions. *Modern Methods of Data Analysis*, pp. 58-125. Newbury Park: Sage Publications.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I. (2002). *Ingeniería geológica*, n. 744.
<http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/2013/08/representatividad-de-la-muestra.html>
- HUBER, L. (2007). *Validation and Qualification in Analytical Laboratories*. Second Edition.
- ILLESCAS, G; SANCHEZ-SEGURA, M. I. Y CANZIANI, G. (2015). Métodos de Pronóstico por Indicadores dentro de la Gestión del Conocimiento Organizacional. *RISTI-Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, n. SPE3, pp. 29-41.
- ISHIHARA, K. (1990). Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills proceedings of the workshop on seismic issues. Port of Los Angeles, California.
- IWASAKI, T; TATSUOKA, F; TOKIDA, K. & YASUDA, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at

various sites in japan. 5 th japan symposium on earthquake engineering, November.

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, C. (1983). Población y muestra. El muestreo. Madrid. UNED, pp. 249.

KENDALL, D. G. (1948). On the number of lattice points inside a random oval. The Quarterly Journal of Mathematics, vol. 19, issue 1, pp. 1–26

KISHIDA, H. (1969). Characteristics of liquefied sands during Mino - Owari, Tohankai, and Fukui earthquakes. Soils and Foundations, IX, n. 1 pp.75-92.

KRAMER, S. & STEWART, J. (2004). Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. En Y.Bozorgnia, & V. Bertero, Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. London. Taylor and Francis Group.

LA TORRE, A; RINCÓN, D. Y ARNAL, J. (2003). Bases Metodológicas de la Investigación Educativa. Barcelona: Experiencia S.L, pp. 82.

LIAO, S. & WHITMAN, R.V. (1986). Overburden Correction Factors for SPT in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, March, pp. 373-377.

MARTÍNEZ RECIO, A. (1999). Una aproximación epistemológica a la enseñanza y el aprendizaje de la demostración matemática. Tesis doctoral.

MOYA FERNÁNDEZ, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. Estudios Geológicos, vol. 65, n. 1, pp. 67-77.

OBANDO, E. (2009). Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos. Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).

- ROBERTSON, P.K. & CAMPANELLA, R.G. (1985). Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 111, n. 3. ISSN 384-403.
- SEED, B. & DE ALBA, P. (1986). Use of SPT and CPT Test for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands. *Use of In situ Test in Geotechnical Engineering*, ASCE, pp. 281-302.
- SEED, B., AND IDRIS, M. (1971). A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potentialll, *Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, n. 97, SM9, pp. 1249- 1273.
- SEED, B., AND IDRIS, M. (1982). Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes. Technical report, Earthquake Engineering Research Institute.
- SEED, B; IDRIS, M. & ARANGO I. (1983). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Datall, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 109, n. 3, pp. 481-485.
- SEED, CETIN, MOSS & KAMMERER. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. California.
- STEIDL, J.H; TUMARKIN, A.G. & ARCHULETA, R.J. (1996). What is a reference site? *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 86.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. (1981). Field Correlation of Soil Liquefaction with SPT and Grain Sizell, *International Conference of Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, University of Missouri-Rolla, pp. 203-208.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. (1983). Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Contentll, *Soils and Foundations*, vol. 23, n. 4, pp. 56-74.
- URRUTIA EGAÑA, M; BARRIOS ARAYA, S; GUTIÉRREZ NÚÑEZ, M. & MAYORGA CAMUS, M. (2014). Métodos óptimos para determinar validez

de contenido. Educación Médica Superior, vol 28, issue 3, pp. 547-558.
Recuperado el 19 de junio de 2019, de
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412014000300014&lng=es&tlng=es.

YEGIAN, M.K. AND WHITMAN, R.V (1978). Risk Analysis for Earthquake-Induced Ground Failure by Liquefaction. Journal of the Geotechnical Division, American Society of Civil Engineers, GT7, July.

YOU, T. & IDRIS, I. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 127, AISSN 1090-0241.

WANG, W. (1979). Some finding in soil liquefaction. Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China.