



## **INFORME TÉCNICO**

### **PROYECTO:**

**“Evaluación y Metodología de Evaluación de Vulnerabilidad ante Subsidiencias de suelos y sismos del Sector Solanda Zona 1 de la Ciudad de Quito, Ecuador”**

**QUITO**



**Diciembre 2018**

## Índice

1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes del Sector .....	3
1.2. Justificación de metodología usada .....	6
2. Análisis Multi-Criterios .....	7
3. Análisis con Lógica Fuzzy .....	7
3.1. Suelos compresibles .....	7
4. Vulnerabilidades .....	10
4.1. Análisis de vulnerabilidades con Machine Learning y Lógica Fuzzy.....	11
5. Resultados .....	15
6. Discusión y Conclusiones.....	17
Referencias.....	18
Firmas de Responsables:.....	19



## **Evaluación y Metodología de Evaluación de Vulnerabilidad ante Subsidiencias de suelos y sismos del Sector Solanda Zona 1 de la Ciudad de Quito, Ecuador**

**Resumen.** Debido a los daños en las construcciones en el sector de Solanda, sur de Quito, Ecuador, se ha realizado un estudio de vulnerabilidad del sector. Se ha evaluado la vulnerabilidad por subsidiencias de suelos y terremotos, debido a los asentamientos diferenciales y peligrosidad sísmica. Se utilizó análisis de Multi-Criterios con juicio de expertos, guiados en parte por modelos computacionales de viviendas tipo con análisis estáticos no lineales, para ambos problemas mencionados. Además, se realizó un levantamiento de la zona con encuestas a cerca de 500 viviendas. Con estos, primero se infirió la compresibilidad del suelo basándose en daños actuales utilizando lógica Fuzzy. Para la vulnerabilidad los datos se procesaron utilizando métodos de Machine Learning (ML), y se disminuyó incertidumbres externas utilizando lógica Fuzzy al usar los resultados de ML como reglas para este último.

### **1. Introducción**

En la ciudad de Quito en el sector de Solanda existen subsidiencias del suelo, causando en las viviendas asentamientos diferenciales. Estos asentamientos ocasionan daños en elementos no estructurales como mamposterías, ventanas, pisos, recubrimientos, etc. Surgen varias hipótesis para justificar lo sucedido, por ejemplo, el diseño y construcción sin respaldo de estudios técnicos (construcciones informales), el suelo de mala calidad bajo las estructuras, o mega construcciones aledañas como la masiva excavación para el Metro Subterráneo de Quito. De cualquier manera, este fenómeno está afectando las estructuras en el sector de Solanda, el presente estudio investiga la vulnerabilidad estructural ante las subsidiencias de suelos y alto peligro sísmico. Se utilizó métodos de Multi-criterios con lógica Fuzzy y un método utilizado en Inteligencia artificial llamado Machine Learning.

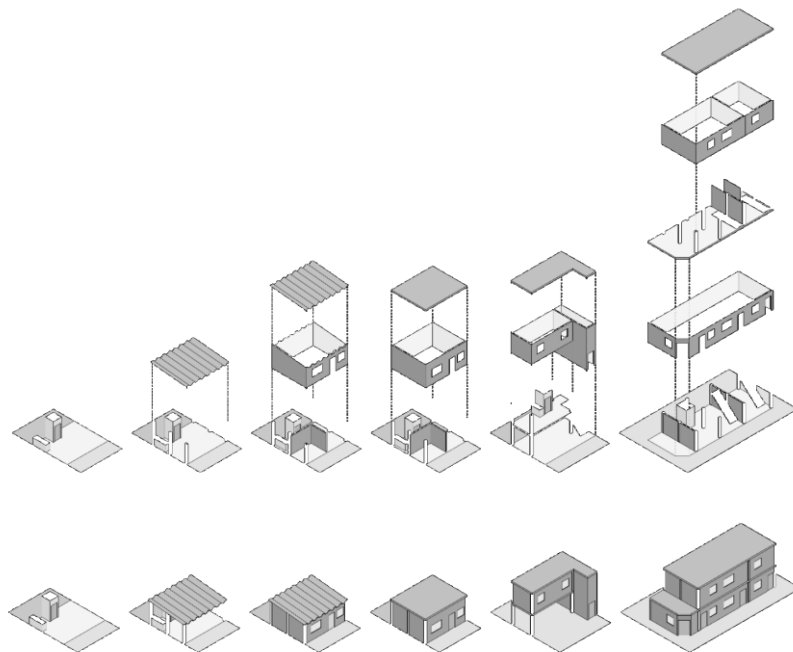
#### **1.1. Antecedentes del Sector**

El área de estudio comprende un conjunto de viviendas implementadas por el Banco de la Vivienda en los años 80, ubicadas en la zona de Solanda, Sur de Quito. (Ver delimitación en rojo de la figura 1). La zona está geo-referenciada con el sistema de coordenadas proyectadas SIRES-DMQ en Este: 495219 y Norte: 9970149. El área de estudio es de aproximadamente 5.70 Ha.

El número de viviendas analizadas fue de 524, distribuidas en 401 terrenos. Estas viviendas fueron planificadas para ser construcciones de máximo 2 pisos, con un área de construcción aproximada entre 40 a 70 m<sup>2</sup> de por planta, como las que se muestran en la figura 2.



*Figura 1. Ubicación: Sur de Quito / Ciudadela Solanda. Google Earth*



*Figura 2. Modelo de casas del proyecto original de Solanda [1]*

Con la finalidad de comprender y predecir el comportamiento de las estructuras ante subsidencias y terremotos, se realizó un levantamiento del área a través de encuestas para cada vivienda, estas fueron llenadas por estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional quienes visitaron todas las viviendas del sector a finales del mes de Julio de 2017. Como resultados se destaca que las viviendas encuestadas mantienen su configuración original en planta y secciones de columnas, pero el número de pisos ha incrementado hasta 5 o más, como se muestra en la figura 3. Estos incrementos de pisos, en su mayoría, no son construcciones técnicas (informales) y han sido ampliadas por lo menos un

piso, como se muestra en la figura 4. Además, casi la totalidad de las estructuras son de hormigón armado, y en su mayoría, son construcciones hechas entre los años 1977 y 2000, como se muestra en la figura 5. Estos resultados dan contexto para los siguientes análisis realizados.



**Figura 3:** Tamaño de columnas en Viviendas, y Número de pisos en las Viviendas



**Figura 4:** Año de construcción de Viviendas, y Viviendas donde se realizaron ampliaciones



**Figura 5:** Estructura de las Viviendas, y Construcción de Viviendas formales

Se comprobó la existencia de daños debido a subsidencias en el lugar, el 74% de las viviendas presentan algún tipo de daño como se muestra en la figura 6. Estos daños son en su mayoría de los elementos más frágiles, por ejemplo, mamposterías y ventanas, también se identificaron varias

fisuras en recubrimientos de elementos estructurales. Esto comprueba la existencia de un problema en este sector.



*Figura 6: Daño en Columnas. Daño en Vigas. Evidencias de asentamientos en Viviendas. Incremento de grietas en Viviendas.*

Este problema fue causado por la existencia de suelos compresibles, lo que se explicará más adelante. Otra posible razón es el tipo de estructuras sin estudios técnicos, esto es evidenciado ya que en años precedentes habían ocurrido problemas similares en este sector, pero estos se han intensificado en los últimos meses (según testimonio de moradores). Entonces, el problema pudo haber sido activado por razones antrópicas, como la implementación de construcciones civiles sobre casi toda la superficie del suelo e impiden la infiltración del agua, y la construcción del metro de Quito el cual debe bombear agua constantemente para sus obras, evitando la recarga de los acuíferos naturales y disminuyendo la presión que el agua subterránea ejercía hacia la superficie. Esto último no puede ser comprobado ahora, debido a que se desconocen los flujos y cantidades de agua subterránea previo a la construcción de viviendas en el sector para contrastarlos con los actuales.

## 1.2. Justificación de metodología usada

Investigaciones realizadas en el sector, como la realizada por Goyes [1] y un estudio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) [2], han confirmado que la gran mayoría de construcciones son informales, por tanto, es difícil predecir con exactitud el comportamiento estructural de las viviendas, ya que todas han sido construidas con diferentes técnicas, materiales estructurales, y no estructurales.

Existen numerosos ensayos para medir la resistencia de los materiales de construcción en edificios existentes, como la extracción de núcleos de hormigón, lector de rayos X para medir diámetros de





acero, entre otros. Pero estos ensayos generan resultados con rangos amplios de variabilidad en edificaciones informales, esto como experiencias de evaluaciones estructurales en Quito. Lo que puede llevar a altos costos de tiempo y dinero, o incluso ser improductivo para este caso. Por estas razones y optimización económica se ha optado por un análisis más general que asuma estas incertidumbres, y sea relativamente rápido, el análisis por Multi-Criterios.

## 2. Análisis Multi-Criterios

Una vez que se ha identificado que existe un problema en este sector, las autoridades deben tomar decisiones con respecto a cómo proceder. Para problemas como el presente donde se debe analizar la vulnerabilidad de más de 400 viviendas, no es sencillo ni económico hacer un análisis para cada una. Por esto se puede utilizar análisis como los descritos para Multi-Criterios, uno de los más sencillos a utilizarse es un modelo de adición lineal [3], el cual ha sido descrito y utilizado por otros autores [4], este método simplemente considera una ponderación  $w_k$  para cada pregunta (variables) de la encuesta realizada  $S_{ik}$ , y se suman los resultados para obtener un nivel de vulnerabilidad  $V$ .

$$V = \sum_{k=1}^n w_k S_{ik} \quad \text{Eq. (1)}$$

Donde,  $n$  es el número de variables, y se debe cumplir con  $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ . Además, la vulnerabilidad  $V$  fue definida como la susceptibilidad de las edificaciones a dañarse por causas externas [5].

Este modelo de adición lineal fue usado en un trabajo similar muy cercano a esta zona en estudio por otros autores, pero para este caso específico se encontraron falencias, como es el caso de no considerar la relación que existe entre las variables, no considerar incertidumbres externas, y además según varios autores no se debe tomar más de 9 variables [6]–[8]. Como comentario, al utilizar el mismo procedimiento en este caso, se obtuvo que edificios de 5 pisos de alto, de hormigón armado, sin un diseño técnico, y de columnas de 250mm x 250mm, tienen una vulnerabilidad sísmica media, lo cual no está bien para una zona de alto peligro sísmico como lo es Quito. Por esto, se optó por buscar otros métodos más adecuados, como el análisis con lógica Fuzzy y Machine Learning.

## 3. Análisis con Lógica Fuzzy

Entre los análisis de Multi-Criterios más usuales están el de Utilidad de Multi-Atributos, Proceso Analítico Jerárquico, Análisis de Lógica Fuzzy, entre otros [6]. Todos han sido utilizados en diferentes problemas para ayudar a la toma de decisiones entre varias alternativas, además existe una gran versatilidad de usos para estos. En este caso se usará un análisis para determinar un nivel de vulnerabilidad en las viviendas existentes, considerando las limitaciones de información sobre las estructuras [9].

Un asunto a tomar en cuenta es la incertidumbre del proceso de Multi-Criterios, uno que la considera en sus análisis es la lógica Fuzzy, por esta razón este es el tipo de análisis utilizado. La lógica Fuzzy es usada para tomar decisiones similares a como lo haría un humano, evalúa variables y el grado de pertenencia de cada variable a una regla. Al existir un conjunto de variables con bordes no limitados solo por sí o no (Booleanos), se disminuyen incertidumbres externas [8], [7].

### 3.1. Suelos compresibles

La Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) realizó un estudio sobre el suelo del lugar, el cual evidencia la existencia de varios estratos de acuíferos y acuitardos [2]. En los primeros 10 a 16



m existen estratos de suelo limoso de baja plasticidad intercalada con capas de arena con espesores de 0.05 m a 1 m propios de acuíferos, además existen otros depósitos que incluyen capas orgánicas. En esta zona se encuentra un nivel freático a menos de 3m desde la superficie. Desde los 12 a 15 m existe un suelo limo-arenoso muy consistente y limos de alta plasticidad. En estratos mayores a 20 m se tiene el acuífero principal compuesto de materiales granulares de mediana permeabilidad. Como resultado se establece que este es un suelo compresible. Además, la PUCE realizó Ensayos de Cono de Penetración Tipo Begemman (CPT), con lo que se obtuvieron resistencias admisibles  $q_a$  muy bajas, cercanas a 30 KPa, dependiendo de varios factores. Asimismo, de aquel estudio se obtuvo que el tiempo estimado de consolidación es de 30 años.

Aquel estudio mencionado fue hecho alrededor de una de las manzanas más afectadas, por lo que podría ser difícil aseverar que existe un suelo compresible en todo el sector en estudio. Por lo tanto, se infirió si es un suelo compresible o no a través del daño observado en las viviendas y el peso de los edificios (el peso se dedujo por la Carga Muerta por el número de pisos), ver figura 6 y 3. También es importante conocer el asentamiento primario esperado por consolidación  $S_c$ , con la ecuación 2 [10] y 3 (ecuación de Skemton para resistencia del suelo  $q_{adm}$ ) se determinó lo que se observa en la tabla 1, estos resultados fueron extraídos del informe de la PUCE [2].

$$S_c = \frac{Cc \cdot Hc}{1 + e_0} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

Donde,  $Cc$  es el índice de compresión,  $Hc$  es la altura del suelo compresible,  $e_0$  es la relación de vacíos inicial,  $\sigma'_f$  es el esfuerzo vertical final, y  $\sigma'_0$  es el esfuerzo vertical inicial.

$$q_{adm} = \frac{\left( 1 + \frac{0.2B}{L} \right) C \cdot Nc}{FS} \quad \text{Eq. (3)}$$

Donde,  $B$  es el ancho de cimentación,  $L$  es el largo de la cimentación,  $C$  es la cohesión del suelo,  $Nc$  es el factor de capacidad de carga correspondiente, y  $FS$  es un factor de seguridad.

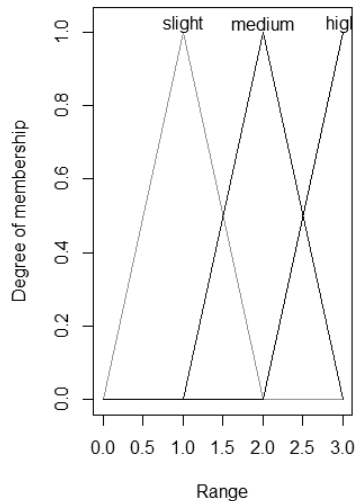
**Tabla 1.** Ancho de cimentación cuadrada requerida vs asentamiento máximo estimado por consolidación, extraído de informe de la PUCE [2]

Ancho de Cimentación cuadrada requerida, a partir de Eq. 3	Asentamiento máximo por consolidación $S_c$
m	mm
2.00	110
3.00	230
4.00	350
5.00	460
6.00	550

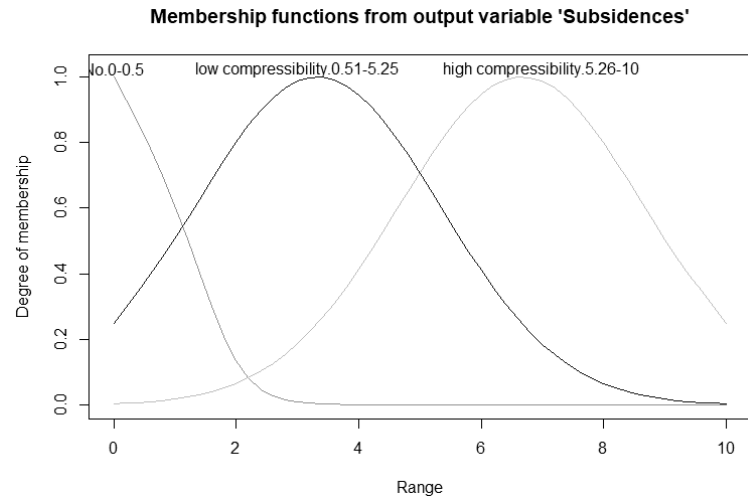
De estos resultados, y sabiendo que las luces de vanos de las viviendas son aproximadamente de 4 a 5 m, se infiere que para un edificio de 1 piso se necesitará un ancho de cimentación cuadrada aproximadamente de 2.6 m en su columna más cargada, de 2 pisos necesitará una cimentación de 3.7 m de lado, de 3 pisos de 4.5 m, de 4 pisos de 5.1 m, de 5 pisos de 5.8 m. Esto es sabiendo que, aunque las casas tienen columnas separadas comparten una misma cimentación. Por lo tanto, ya que las cimentaciones de las estructuras no técnicas de 5 pisos probablemente no fueron diseñadas para soportar esa cantidad de pisos, el asentamiento esperado puede ser mucho mayor a 550mm, según la tabla 1.



Para realizar el análisis con lógica Fuzzy se realizaron códigos de programación basados en funciones propias del software libre CRAN R [11]. Primero, se estableció los datos de entrada con los cuales trabajar, se tomó las preguntas de las encuestas relacionadas con daños estructurales y no estructurales, además el número de pisos, para el proceso se convirtieron los datos a variables Fuzzy donde se deben colocar límites, como se muestra en la figura 7. Y luego se estableció límites para los datos de salida como se muestra en la figura 8.



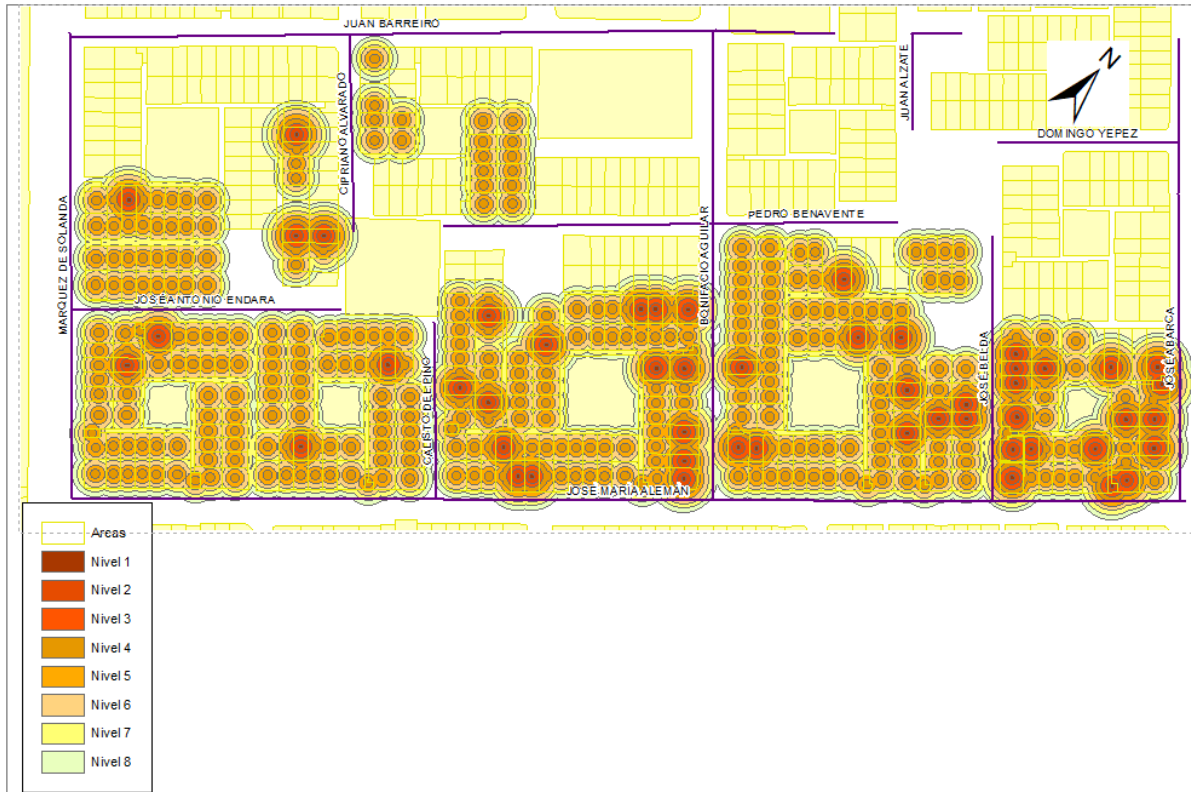
**Figure 7:** Datos de entrada Fuzzy



**Figura 8:** Datos de salida Fuzzy

En los datos de entrada se estableció niveles de daño como bajo, medio y alto, y para los datos de salida se establecieron límites proporcionales con las siguientes características: 1) Actualmente no se tiene evidencias de que sea un suelo compresible, 2) se tiene evidencias de una baja compresibilidad, y 3) se tiene evidencias de una alta compresibilidad. El siguiente paso es crear reglas con condiciones en forma de matrices. Por ejemplo, {Si se tiene una estructura de menos de 3 pisos (1), y se tienen grietas mayores a 4mm (2), y existe un incremento de grietas (2), y el edificio está fuera de plomo más de 3 grados (2), y existen grandes fisuras en pisos (2), y existe rotura en ventanas y puertas trabadas (2), y se evidencia asentamientos diferenciales (2), se tiene un suelo altamente compresible (3), esta condición tiene un peso de (1), y son condiciones de unión  $\cup$  (1)}, se coloca una matriz con los números entre paréntesis, así: *vector de regla1* = {1,2,2,2,2,2,2,3,1,1}; como esta se colocaron 21 reglas.

Se realizó este análisis para determinar si las estructuras están sobre suelo compresible o no, dando un radio de un posible suelo compresible. Para suelos de baja compresibilidad se tomó un radio de 5 m, ya que los edificios tienen luces aproximadamente de 5 m y es muy probable que las casas contiguas también estén sobre un tipo de suelo similar, y con este criterio se tomó para suelos altamente compresibles un radio de 10 m. En la figura 9 se muestran los resultados a través de mapas temáticos del sector.



**Figura 9:** Identificación de suelos compresibles según daños por subsidencias. Nivel 1: Suelo posiblemente más compresible.

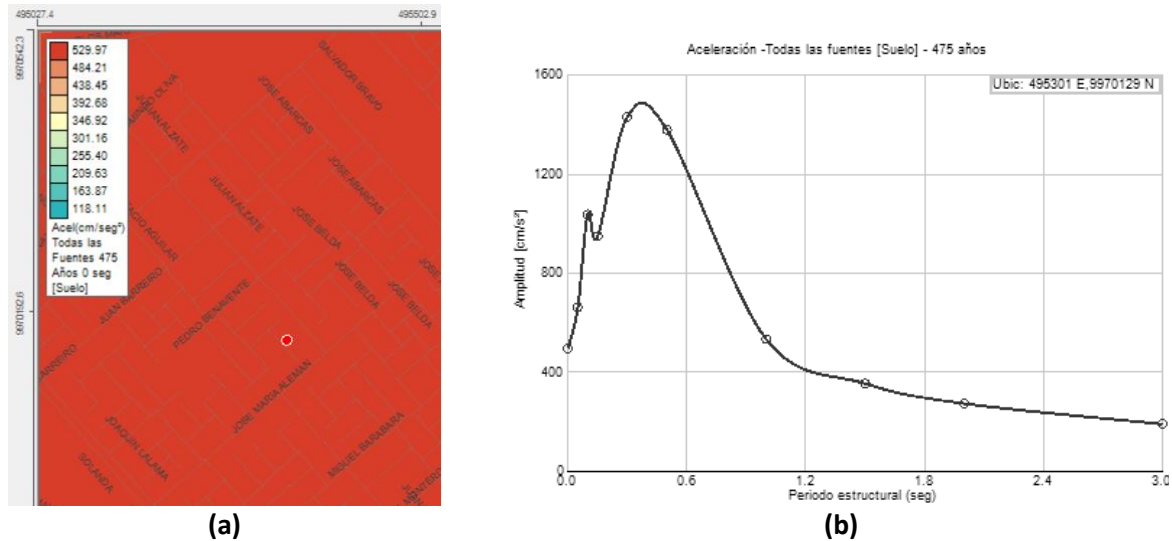
Con estos resultados se estableció que todas las estructuras estudiadas pueden estar en suelo compresible, como se ve en la figura 9. Por lo tanto, se estudiará una vulnerabilidad ante subsidencias de todas las estructuras del área de estudio.

#### 4. Vulnerabilidades

Se obtuvo la vulnerabilidad utilizando la lógica Fuzzy de la siguiente manera [12]:

$$V_{\text{damage}} = \{i | \text{Damage}_j(i) > \alpha, i \in S, j \in H\} \quad \text{Eq. (4)}$$

Donde,  $V$  es la vulnerabilidad,  $\text{Damage}_j$  es la probabilidad de tener un nivel de daño durante un escenario (como un terremoto),  $S$  es el espacio geográfico,  $H$  es la amenaza probable que puede ocurrir, y  $\alpha$  es un cierto límite de pertenencia. En este caso, para esta zona  $S$  se tiene la amenaza de subsidencias mostradas en la sección anterior de este estudio, y para la amenaza sísmica se usó el Sistema de Información Sísmica para la Ciudad de Quito (SisQuito) [13] para encontrar la correspondiente aceleración sísmica en este lugar, en la figura 10.a se muestra que la aceleración PGA para un periodo de retorno de 475 años es de  $529,97 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  en la zona en estudio, y en la figura 10.b se muestra el espectro de diseño.



**Figura 10:** a) Aceleración a nivel de suelo en el sector de estudio. b) Espectro de diseño para sector de estudio para un periodo de retorno de 475 años

En base a las amenazas descritas, se decidió utilizar Machine Learning con Lógica Fuzzy. Se escogieron los datos de entrada más representativos que determinen la vulnerabilidad por subsidencias y luego por terremotos. Al principio se pensó en utilizar solamente lógica Fuzzy, por lo que se desarrollaron reglas para este método, las cuales fueron ejemplos de análisis de estructuras individuales, pero luego de tener cerca de 40 ejemplos con 6 variables (estas variables no incluyen daños actuales de los edificios) los resultados aún no fueron satisfactorios comparados con los daños vistos en la realidad de ciertas estructuras. Por lo tanto, se utilizó Machine Learning y se disminuyeron las incertidumbres externas con lógica Fuzzy.

#### 4.1. Análisis de vulnerabilidades con Machine Learning y Lógica Fuzzy

Machine Learning es un método computacional que permite predecir resultados, suele ser usado en Inteligencia Artificial. Está basado en una fase de aprendizaje donde se colocan matrices similares a las usadas como reglas mostradas en el análisis Fuzzy, se realizaron 100 ejemplos para el aprendizaje, a este se lo conoce como aprendizaje supervisado [14]. Estos funcionan con una Red Neuronal Artificial (ANN) la cual es un marco de trabajo para los algoritmos usados en Machine Learning, usa conexiones llamadas bordes que reciben datos en sus neuronas artificiales, y los datos de salida son tratados por alguna función no lineal. Estas neuronas tienen unos pesos que son ajustados en el proceso de aprendizaje [15]. Para este análisis se usaron funciones del software de código abierto CRAN R [16].

Como se indicó, para el proceso de aprendizaje se hicieron varias matrices para la fase de aprendizaje en Machine Learning y los resultados fueron usados para las reglas del análisis de Lógica Fuzzy (con funciones similares a las observadas en la figura 7 y figura 8). Para la vulnerabilidad por subsidencias se usaron los datos de entrada más representativos, ya que como se mencionó antes no se tienen resultados aceptables si se utilizan muchas variables. Las variables y las reglas fueron colocadas pensando en el posible daño estructural que se puede tener, los números menores son los que favorecen al edificio a no sufrir daños. Estas variables fueron:

- Informalidad de la construcción. (0 o 1)
- Número de Pisos. (1 a 5) (Incluye ampliaciones de pisos)
- Paredes Confinadas. (0 o 1)



- Tipo de Estructura. (1: Hormigón armado o Acero, 2: Madera o Caña, 3: Mampostería simple)
- Tamaño de columnas. (1: 250x300mm o mayores, 2: 250x250mm, 3: 200x200mm)
- Edificio aislado, esquinero o intermedio. (0 a 2)
- Apreciación de Vulnerabilidad de encuestador. (1: Baja, 2: Intermedia, 3: Alta)

Para la vulnerabilidad por sismos se tomó:

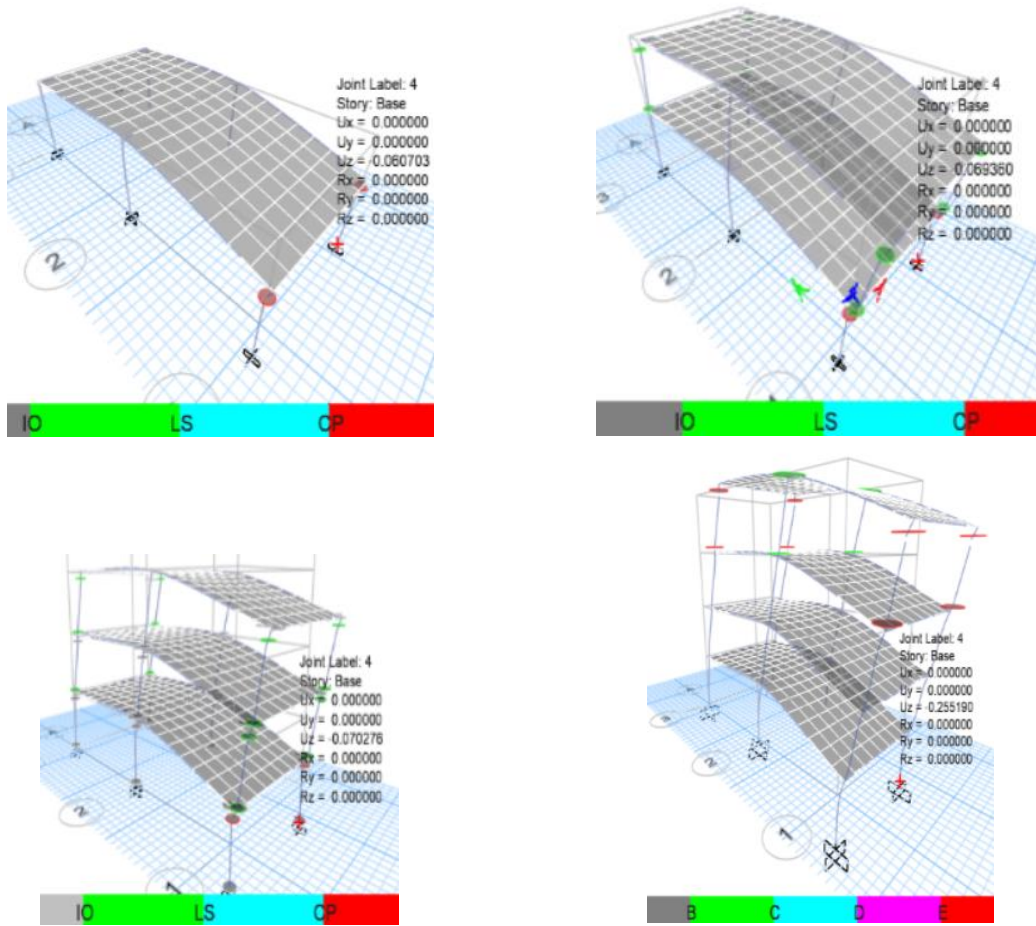
- Informalidad de la construcción y piso blando. (0 o 1)
- Número de Pisos. (1 a 5) (Incluye ampliaciones de pisos)
- Tipo de Estructura. (1: Hormigón armado o Acero, 2: Madera o Caña, 3: Mampostería simple)
- Tamaño de columnas. (1: 250x300mm o mayores, 2: 250x250mm, 3: 200x200mm)
- Golpeteo. (0: No es posible, 1: Coinciden los pisos con los edificios contiguos, 2: Puede existir golpeteo y no coinciden los pisos (columna corta))
- Vulnerabilidad por subsidencias y apreciación de vulnerabilidad de encuestador. (1: Baja, a 6: Alta)

De todas las encuestas no se encontraron irregularidad en planta, además que todas las estructuras están demasiado cercanas entre sí como para desarrollar problemas de torsión. También, de todas las estructuras, ninguna declaró funcionar como bodega, de acuerdo a las encuestas realizadas. Y los entrepisos son en su mayoría de losas planas, y las que tienen vigas descolgadas no garantizan un mejor comportamiento estructural. Por lo que, no se tomaron en cuenta estas para en análisis de vulnerabilidades.

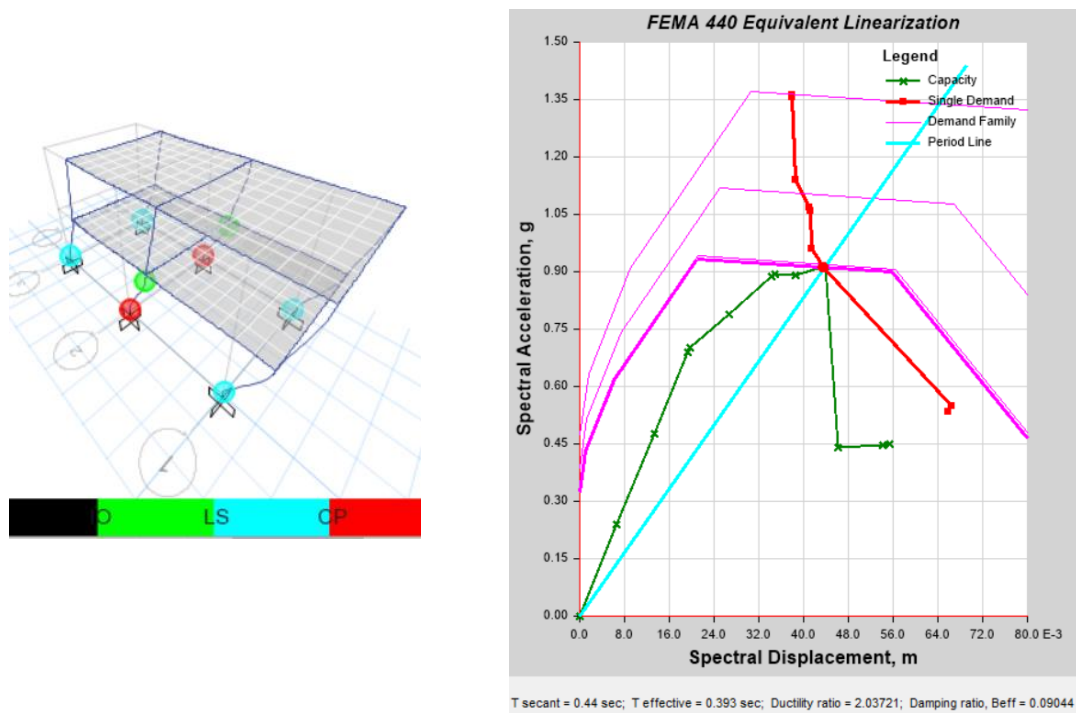
Para los resultados de salida de la vulnerabilidad se tomó:

- Sin daño. (1)
- Daño leve de elementos no estructurales. (2)
- Daño moderado de elementos no estructurales. (3)
- Daño estructural leve. Daño moderado de elementos no estructurales. (4)
- Daño estructural moderado o posible colapso. Colapso de elementos no estructurales. (5)
- Colapso de la estructura. (6)

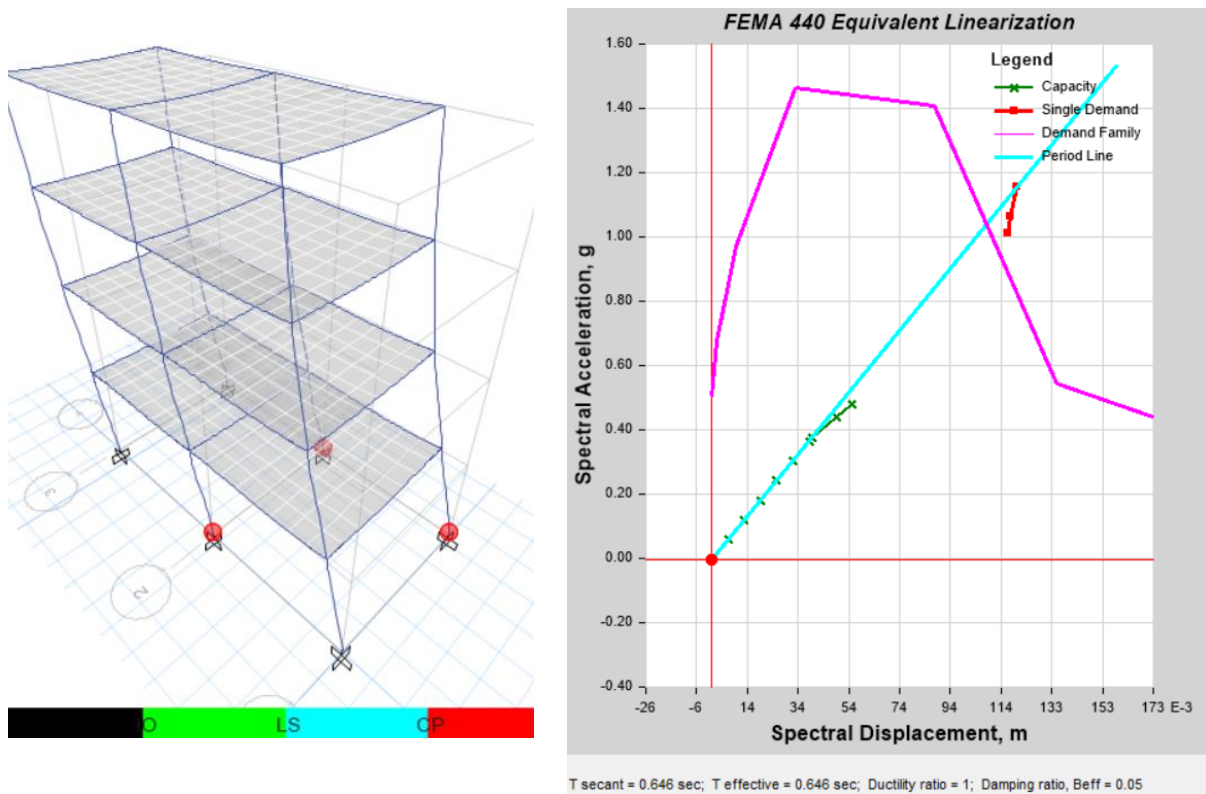
Los ejemplos de entrenamiento (o reglas) fueron derivados de la experiencia de profesores de la Escuela Politécnica Nacional, y fueron validados con unos cuantos modelos computacionales no lineales estáticos para subsidencias y sismos, los cuales siguieron lineamientos descritos en los códigos internacionales ASCE 7 y 41 [17], [18] y los mismos son aceptados localmente por la Norma Ecuatoriana de la Construcción [19]. Para estos modelos se tomaron solo valores típicos máximos, como losas planas de 25 cm de espesor, columnas de 250x250mm, distancias de ejes de 4m, hormigón de resistencia a la compresión de  $f'c \approx 18MPa * 1.3 \approx 24MPa$  (considerando recomendaciones por sobre resistencia debido a la edad del hormigón [18]), acero de  $f_y = 420MPa$  (con armado fotografiado de unas pocas estructuras que permiten ver refuerzos en las columnas). En la figura 11 y figura 12 se colocan evidencias de estos modelos de varias estructuras con configuración de 6 columnas, los mismos se usaron para modelos de configuración de 9 columnas, pero estos últimos no fueron presentados en las figuras ya que los resultados fueron muy similares. En estos modelos se trabajó con deformaciones hasta encontrarse con problemas de convergencia en los programas, pero fueron suficientes para conocer posibles daños estructurales. Y, la modelación de las rótulas tanto para subsidencias como para sismos fueron tomadas de recomendaciones del ASCE 41 [18].



*Figura 11: Deformaciones en metros por asentamientos diferenciales y daños estructurales. Para edificios de 1, 2, 3 y 4 pisos.*







*Figura 12: Izquierda superior: Daño estructural en edificio de 2 pisos en paso de punto de desempeño. Derecha superior: Curva de capacidad, de demanda y punto de desempeño de edificio de 2 pisos. Izquierda inferior: Daño estructural en edificio de 4 pisos en paso de punto de desempeño. Derecha inferior: Curva de capacidad, de demanda y punto de desempeño de edificio de 4 pisos.*

En la figura 11 y figura 12 se muestra el resultado de daño máximo en los extremos de los elementos estructurales. Los niveles de daños mostrados corresponden a los dados por el código ASCE 41 [18]. Donde, IO es Ocupación Inmediata, LS es seguridad de vida, y CP es Prevención al Colapso. Para casos extremos en estructuras destinadas a viviendas, no se debe pasar el nivel LS, pero se debe establecer que un caso extremo debe incluir terremotos para una zona de alta amenaza sísmica. En la figura 11 se muestran las deformaciones en metros, donde UZ es la deformación vertical.

En la figura 12 se muestran los resultados dados por el análisis estático no lineal para cargas laterales. En el lado derecho superior se muestra la curva de capacidad y la curva de demanda (ver figura 10.b), para la estructura de dos pisos se halló el punto de desempeño en el paso 9, esto quiere decir que se puede visualizar el daño estructural en ese paso, el cual es mostrado en el lado izquierdo superior, allí se observan rótulas mayores al nivel de Prevención al Colapso, por lo que esta estructura podría no ser aceptable para un caso extremo. Para la edificación de 4 pisos no se encontró un punto de desempeño debido al mal comportamiento que las estructuras pueden tener ante un sismo, como se observa en el lado izquierdo inferior, pero este puede ser un caso crítico ya que no se considera la interacción con otras estructuras, en el lado derecho inferior se observa que las estructuras en el último paso del análisis dan rótulas plásticas mayores al nivel de Prevención al Colapso, por lo que no es aceptable un edificio con estas características.

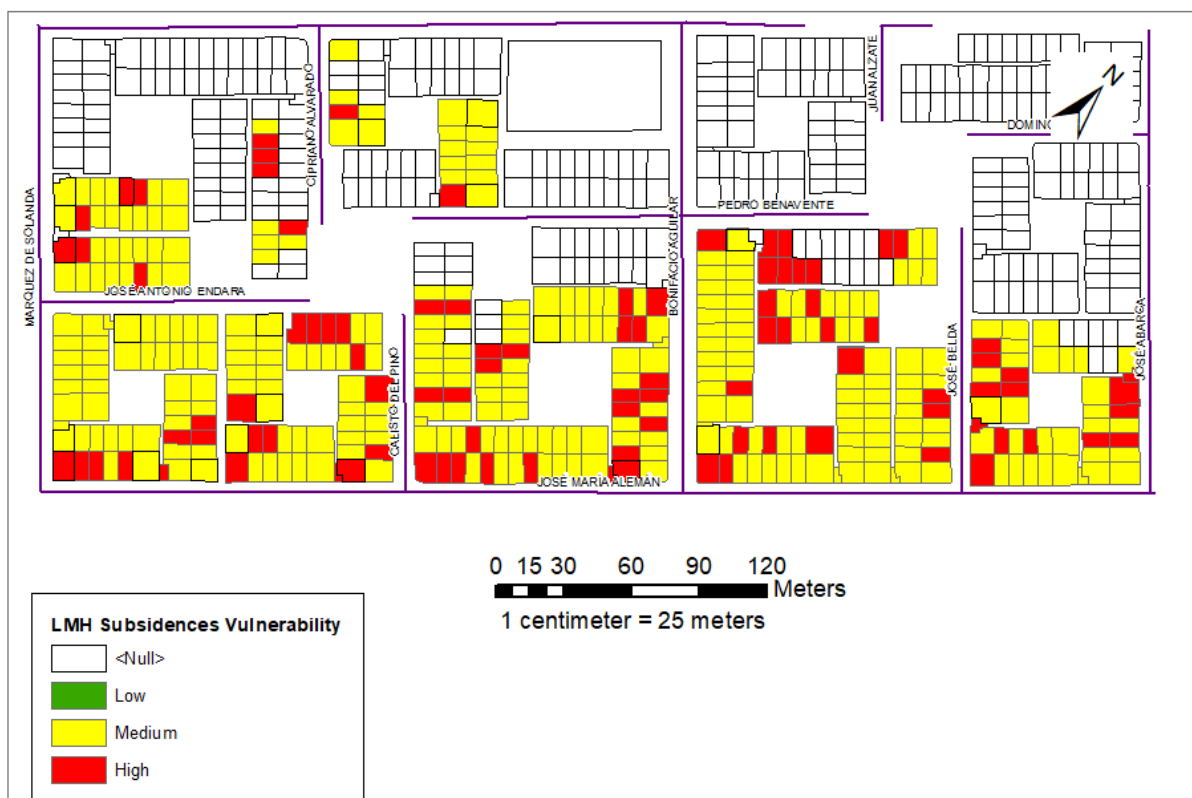


Basado en estos resultados se crearon los ejemplos para alimentar el proceso de ML. Una vez hecho este análisis, y ya que los datos de entrenamiento para el proceso fueron basados en criterios con incertidumbre, se decidió refinar los resultados al final con Lógica Fuzzy. Todos los resultados que se obtuvieron del análisis ML de las más de 400 viviendas sirvieron como reglas en los análisis Fuzzy, además se agregaron dos reglas con operador de intersección, que marcan los límites superiores e inferiores, esto se lo programó para que suceda automáticamente en CRAN R.

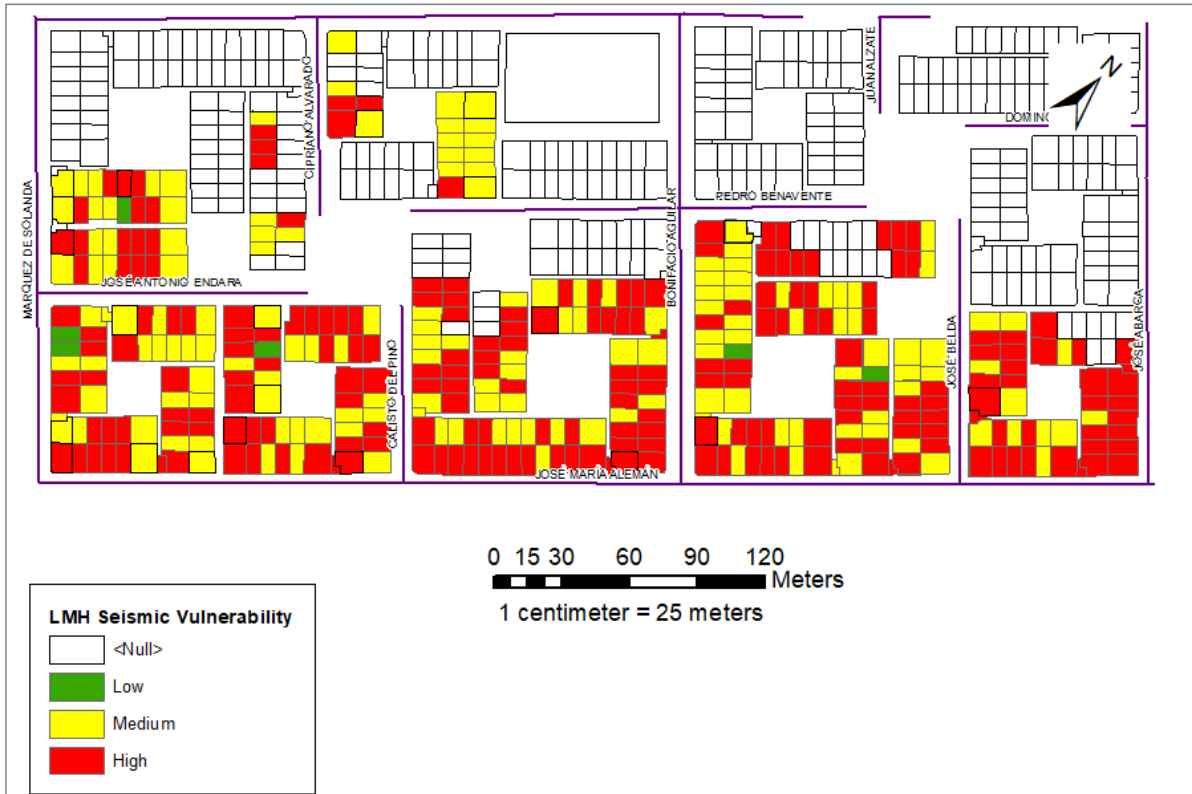
## 5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de vulnerabilidad usando el proceso descrito anteriormente. En la figura 13 se muestra la vulnerabilidad solo por subsidencias, en la figura 14 la vulnerabilidad solo por sismos, y en la figura 15 la vulnerabilidad de sismos sobre estructuras previamente dañadas por subsidencias. Además, en figura 16 se colocó la precisión dada para los análisis usando ML. Asimismo, ya que no es posible predecir con certeza daños específicos en los edificios se usó solamente 3 niveles de daño que abarcan los 6 niveles descritos anteriormente:

- Leve: Sin daño, o daño leve de elementos no estructurales.
- Medio: Daño moderado de elementos no estructurales, o daño estructural leve y daño moderado de elementos no estructurales.
- Alto: Daño estructural moderado o posible colapso y colapso de elementos no estructurales, o colapso de la estructura.



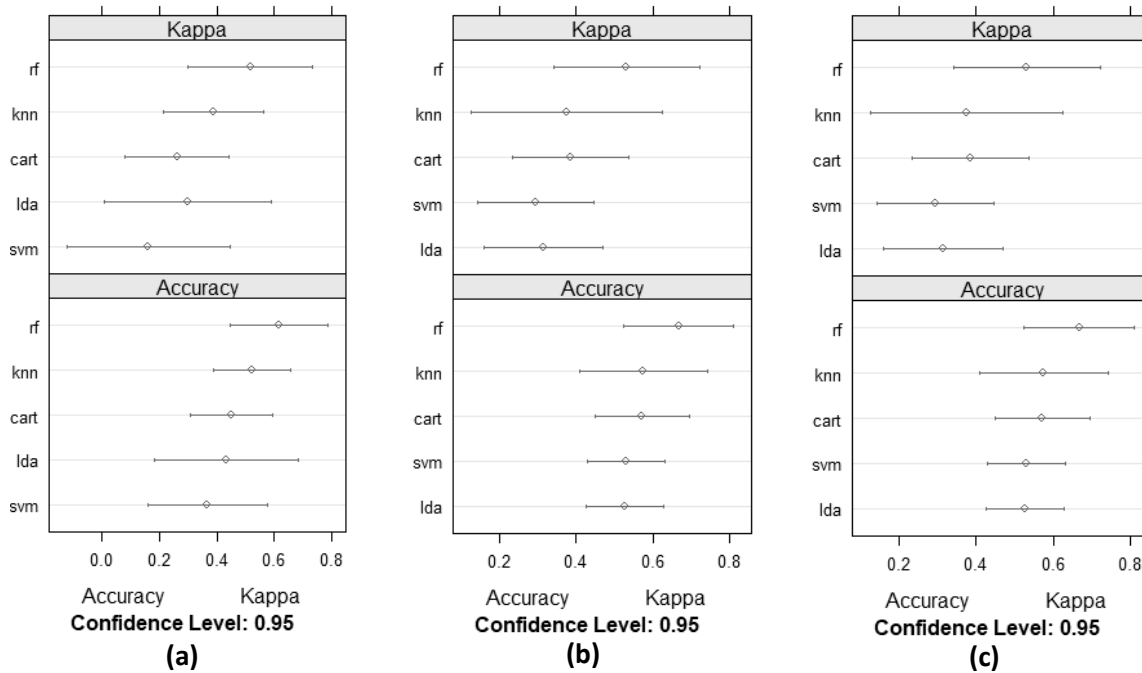
*Figura 13: Vulnerabilidad por Subsidiencias*



*Figura 14: Vulnerabilidad por Sismos*



*Figura 15: Vulnerabilidad por Sismos en estructuras previamente dañadas por subsidencias*



*Figura 16: a) Precisión usando k fold cross-validation y coeficiente Kappa*

En la figura 16 se muestran los resultados de precisión y coeficientes Kappa para varios tipos de algoritmos. Los algoritmos que se observan en la figura son Linear Algorithms (Ida), Nonlinear Algorithms (CART y KNN), y Advanced Algorithms (SVM y Random forest (rf)). Se analizaron todos estos métodos y se utilizó el que tenía una mayor validez, se observa que el de mayor validez fue el método Random forest (rf). Este método tiende a ser un modelo con una precisión mayor a otros de árboles de decisión [16].

Para determinar la validez del proceso se usó un método robusto usual para ML llamado k fold cross-validation. En este método la muestra para entrenamiento es dividida en  $k$  sub-muestras, una de las sub-muestras no es usada para el entrenamiento si no al final del proceso para verificar la certeza de predecir resultados, este se muestra en la figura 16 [20]. Además, se validan los resultados con los coeficientes Kappa, estos tratan con errores métricos para evaluación y creación de modelos, midiendo la relación entre precisión observada y precisión esperada, en Ramasubramanian [16] se dan unos límites que guían los resultados: 1) menores a 0.20 es una pobre coincidencia, 2) entre 0.20 y 0.40 es una coincidencia razonable, 3) entre 0.40 y 0.60 es una coincidencia moderada, 4) entre 0.60 y 0.80 es una buena coincidencia, 5) entre 0.80 y 1.00 es una coincidencia muy buena. Para este caso se obtuvo precisiones entre 0.60 y 0.80, y coeficientes Kappa cerca de 0.50, por lo que se puede decir que se tiene una coincidencia moderada. Ya que para ML se debe encontrar un equilibrio con relación al número de datos de aprendizaje y la precisión, puesto que se usaron 100 datos de aprendizaje, y luego se usó lógica Fuzzy para disminuir incertidumbres, se aceptaron estos resultados.

## 6. Discusión y Conclusiones

En las figuras de la 13 a la 15 se muestra que el 23% de las estructuras tienen una alta vulnerabilidad por subsidencias, 56% tienen una alta vulnerabilidad por sismos, y se combina vulnerabilidad por subsidencias y sismos 60% de las estructuras tienen alta vulnerabilidad.



A pesar de que los modelos computacionales de estructuras individuales mostraron daños estructurales con asentamientos menores a los indicados por los estudios de suelos es difícil evaluar el nivel de asentamientos diferenciales (en contraste a asentamientos totales). Por lo que, fue conveniente utilizar lógica Fuzzy, ya que considera este tipo de incertidumbres.

Igualmente, tomar en cuenta estas incertidumbres ayuda a considerar la cercanía de las viviendas entre si y la incertidumbre de no conocer la real interacción entre estas durante sismos. Debido a que esta interacción puede perjudicar o puede ayudar a ciertos edificios (estructuras con peligro de golpeteo donde coincidan las losas) [21].

Los edificios informales de más de 3 pisos tienen una alta vulnerabilidad ante subsidencias y sismos. Ya que existen altas probabilidades de que sus cimentaciones no hayan sido planificadas para edificios de esa cantidad de pisos o mayores, esto se puede notar por el tamaño de columnas de secciones muy pequeñas, por esta misma razón las estructuras evaluadas de 3 pisos y especialmente mayores a 4 pisos no son aptas para desempeñarse adecuadamente ante sismos probables en la ciudad de Quito.

### Referencias

- [1] V. Vidal and F. Goyes, "Las Cajitas de Fósforo : The Solanda Housing Project / Massachusetts Institute of Technology - MIT," Quito, 2016.
- [2] G. Realpe, L. Villafuerte, and J. Bucheli, "Estudio de Diagnóstico - Preliminar 'Asentamiento de viviendas en el Barrio de solanda, en la ciudad de Quito de la provincia de Pichincha,'" Quito, 2018.
- [3] R. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with multiple objectives*. New York: University of Cambridge, 1993.
- [4] C. Kappel, B. Halpern, K. Selkoe, and R. Cooke, *Expert Knowledge and Its Application in Landscape Ecology*. New York: Springer, 2012.
- [5] J. Birkmann, S. Kienberger, and D. Alexander, *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards*. San Diego: Elsevier, 2014.
- [6] J. Malczewski and C. Rinner, *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. New York: Springer, 2015.
- [7] S. Banerjee, S. Ercetin, and A. Tekin, *Chaos Theory in Politics*, 1st ed. Dordrecht: Springer, 2014.
- [8] I. N. Durbach and T. J. Stewart, "Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 1, pp. 1–14, 2012.
- [9] W. Pedrycz, P. Ekel, and R. Parreiras, *Fuzzy multicriteria decision-making: Models and Applications*, 1st ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] A. Schofield and P. Wroth, *Critical State Soil Mechanics*. Cambridge: McGraw-Hill, 1968.
- [11] C. Wagner, S. Miller, and J. M. Garibaldi, "A Fuzzy Toolbox for the R Programming Language," in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2011, pp. 1185–1192.
- [12] T. Rashed and J. Weeks, "Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 17, no. 6, pp. 547–576, 2002.



- [13] J. Tristancho and L. Yamin, "Sistema de Información Sísmica para la Ciudad de Quito (SisQuito)." Alcaldía de Quito, Bogota, 2012.
- [14] S.-S. Shai and B.-D. Shai, *Understanding Machine Learning : From Theory to Algorithms*, 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [15] J. Hartmanis and J. Van Leeuwen, "Artificial Neural Networks and Neural Information," 2003.
- [16] K. Ramasubramanian and A. Singh, *Machine Learning Using R: With Time Series and Industry-Based Use Cases in R*, 2nd ed. New York: Springer, 2019.
- [17] ASCE/SEI 7, *Minimum Design Loads and Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2016.
- [18] ASCE/SEI 41, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers, 2017.
- [19] NEC, *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro sísmico - Diseño Sismo Resistente*, 1st ed. Quito: Ministry of urban development and housing, 2015.
- [20] G. McLachlan, K.-A. Do, and C. Ambrose, *Analyzing Microarray Gene Expression data*, 1st ed. New Jersey: Wiley, 2004.
- [21] R. Jankowski and S. Mahmoud, *GeoPlanet : Earth and Planetary Sciences Earthquake- Induced Structural Pounding*, 1st ed. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2015.

Edgar David Mora Martínez, Ing. MSc.

**Firmas de Responsables:**

Edgar Mora, Ing. MSc.  
Profesor titular

Nicolay Yanchapanta, Ing. MSc.  
Profesor titular

Christian Gómez, Ing. MBA  
Coordinador del Centro de Investigación de la Vivienda

Gastón Parra, Ing.  
Especialista del Centro de Investigación de la Vivienda