

2 APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL MUNICIPIO DE TUNJA

Diego Fernando Gualdrón Alfonso
José Julián Villate Corredor
Emerson Rodrigo Rodríguez
David Santiago Amaya Huertas
Santiago Buitrago Pérez

2.1 Introducción

Colombia, al igual que varios países de América Latina, enfrenta grandes retos que amenazan su desarrollo debido a las consecuencias dadas por la ocurrencia de fenómenos naturales, agravados por las condiciones socio-económicas. Dentro de los eventos más críticos para el país, está la posibilidad de un terremoto, ya que, Colombia se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas, denominada Anillo Circumpacífico. Adicionalmente, el actual Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (NSR-10) en su Título A., expone que el departamento de Boyacá, al igual que su capital Tunja, poseen una significativa amenaza frente a la ocurrencia de sismos debido a su ubicación en una zona de sismicidad intermedia (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En vista de la imposibilidad de intervenir la amenaza sísmica y a las consecuencias que se presentan ante estos eventos, el Estado se ve en la obligación de gestionar nacional, departamental y municipalmente la reducción del riesgo a partir de medidas de mitigación y prevención, considerando mecanismos como la implementación de herramientas informáticas especializadas. Es así, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), toman relevancia en los procesos de ejecución del urbanismo y medidas de prevención de riesgos, optimizando los análisis y manejo de

datos, así como reducir los tiempos de estudio de la información y por tanto, de la toma de decisiones.

Por lo anterior, el fin de este trabajo, se enmarca en implementar los SIG para plasmar de manera gráfica, la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Tunja como una herramienta que se constituya en insumo para los organismos de emergencia y priorizar la atención a desastres en la ciudad frente a un posible evento telúrico.

Esta investigación, se realiza mediante la adaptación de la metodología presentada por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismorresistentes (FUNVISIS) de detección visual rápida, la cual permite inventariar, identificar y evaluar edificios que son potencialmente peligrosos desde el punto de vista sísmico y que se basa en el levantamiento de la fachada de las edificaciones y un formulario de recolección de datos. El proyecto presenta la implementación de los SIG como herramienta principal que favorece el procesamiento de la información recolectada y su posterior análisis.

2.2 Definición de los parámetros y puntajes para el cálculo del índice de Vulnerabilidad con base en la Metodología FUNVISIS

A lo largo de la historia, los efectos causados por los sismos a las estructuras, han sido analizados, lo que conlleva a establecer los lineamientos para el diseño estructural sísmo resistente.

Después de un desastre sísmico, se analizaron los daños a los diferentes componentes estructurales de varias edificaciones. A través de esa evaluación inicial, el objetivo fue identificar aspectos de diseño estructural o procesos de construcción que incidieron en las fallas mencionadas. Por lo anterior, este estudio realiza una evaluación de vulnerabilidad cuantitativa, utilizando parámetros definidos por un experto, lo que ayuda a establecer una visión general del alcance de las vulnerabilidades encontradas en diferentes edificaciones.

2.2.1 Índice de Vulnerabilidad

El propósito primordial del Índice de Vulnerabilidad consiste en discernir y cuantificar aquellos atributos inherentes de una estructura que, en situaciones de sismicidad, podrían contribuir significativamente a un desempeño inadecuado durante un sismo” (López et al., 2014)

La vulnerabilidad sísmica de una edificación depende de su antigüedad, sistema o sistemas estructurales, irregularidades presentadas, la profundidad del depósito de suelo, el grado de deterioro y la topografía del sitio. El Índice de Vulnerabilidad (I_v) se define según el formato FUNVISIS de la siguiente manera:

$$I_v = \sum_{i=1}^6 \alpha_i I_i \quad (1)$$

$$I_v = \alpha_1 I_1 + \alpha_2 I_2 + \alpha_3 I_3 + \alpha_4 I_4 + \alpha_5 I_5 + \alpha_6 I_6 \quad (2)$$

Donde:

α_i =Peso Relativo.

I_1 =Vulnerabilidad de la edificación asociado a la Antigüedad y norma utilizada.

I_2 =Vulnerabilidad de la edificación asociado al Sistema estructural.

I_3 =Vulnerabilidad de la edificación asociado a las Irregularidades.

I_4 =Vulnerabilidad de la edificación asociado con Profundidad del depósito.

I_5 =Vulnerabilidad asociado con Topografía.

I_6 =Vulnerabilidad asociado al Grado de deterioro.

A través de la ecuación anterior, el Índice de Vulnerabilidad se estableció por medio del peso relativo de cada uno de los parámetros a evaluar. Se realizó una evaluación iniciando en el Proceso Jerárquico Analítico, el cual contó con la participación de 11 profesionales especialistas en temas estructurales proporcionando un juicio según la escala implementada en la metodología aplicada.

Dicho procedimiento, se encuentra a detalle en el apartado 2.3. Metodología AHP para la asignación de ponderados de los Índices de Vulnerabilidad específicos.

En la Tabla 4., se definen seis rangos del Índice de Vulnerabilidad y se califican desde una muy baja a una muy elevada vulnerabilidad.

Tabla 4. Valoración del Índice de Vulnerabilidad

Calificación de la Vulnerabilidad	Rango de Valores
Muy Elevada	$80 \leq lv \leq 100$
Elevada	$60 \leq lv < 80$
Media	$40 \leq lv < 60$
Baja	$20 \leq lv < 40$
Muy Baja	$0 \leq lv < 20$

Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). *Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente.* Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V, 29, 107–126.

2.2.2 Índice de Vulnerabilidad asociado a la antigüedad

Basados en la historia de la normativa colombiana referente al diseño sismo resistente, se definió el valor del Índice de Vulnerabilidad asociada a la antigüedad estructural. Es decir, se puede relacionar la antigüedad de la estructural con su vulnerabilidad estructural.

Para definir este índice, se precisaron seis periodos temporales, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores del Índice de Vulnerabilidad asociado con la antigüedad

Año de la construcción	Descripción	Puntaje
Anterior a 1949	Los materiales que se utilizaron en esta fecha, como el ladrillo, madera y cemento, tienen una vida útil de 70 años, por lo cual, se le asigna la mayor valoración.	100
1950 a 1969	En este lapso de tiempo no hubo ninguna norma sismo resistente.	90
1970 a 1984	Surgió el Decreto temporal 1400 de 1984, el cual tuvo una vigencia de 14 años, y dio como resultado la primera norma, que contempla conceptos de sanciones, cargas, mampostería estructural de uno y dos pisos, entre otros.	80
1984 a 1998	Demora en la implementación del Decreto 1400 de 1984.	50
1998 a 2010	Se establecen las curadurías, se especifica la idoneidad del diseñador, se establecen parámetros de supervisión técnica de diseño y construcción, con lo cual se consolida la Norma Sismo-resistente de 1998.	30
Posterior del 2010	Entró en vigencia la Norma Sismo-resistente NSR 10.	20

Nota. Adaptado a partir de García, L. E. (2014). *Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición*. Revista de Ingeniería, 41, 71-77. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>

2.2.2.1 Índice de Vulnerabilidad asociado al sistema o sistemas estructurales

Los sistemas estructurales de resistencia sísmica que reconoce el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en el numeral A.3.2 asociados al tipo estructural y de resistencia sísmica son los siguientes:

- Sistema de muros de carga.
- Sistema combinado.

- Sistema de pórtico.
- Sistema dual.

Cada uno de ellos, se subdivide según los tipos de elementos verticales utilizados para resistir las fuerzas sísmicas y el grado de capacidad de disipación de energía del material estructural empleado según el Título C de la NSR-10 (2010):

→ **Sistema de muros de carga**

Es un sistema estructural que no dispone de un pórtico esencialmente completo y en el cual las cargas verticales son resistidas por los muros de carga y las fuerzas horizontales; así como por muros estructurales o pórticos con diagonales.

→ **Sistema combinado**

Las cargas verticales son resistidas por un pórtico esencialmente completo, pero, que no resiste los momentos, esto ocurre cuando las columnas no son lo suficientemente rígidas como para soportar las fuerzas horizontales, por lo cual, se realizan adicionalmente muros de carga o pórticos con diagonales que resistan estas fuerzas.

De igual manera, las cargas y fuerzas horizontales son resistidas por un pórtico esencialmente completo, resistente a momentos, combinado con muros de carga o pórticos en diagonales, y no cumple los requisitos de un sistema dual.

→ **Sistema de pórtico**

Es un sistema estructural compuesto por un pórtico espacial, resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales.

→ **Sistema dual**

Conformado por un pórtico espacial resistente a momentos y sin diagonales, combinado con muros estructurales o pórticos

con diagonales, capaz de soportar las cargas verticales y las fuerzas horizontales. Se diseñan de tal manera, que, en conjunto sean capaces de resistir la totalidad del cortante sísmico en la base, en proporción a su rigidez relativa.

La metodología del FEMA (Agencia Federal para el Manejo de Emergencia) y el FUNVISIS, consideraron 15 tipos de sistemas estructurales comúnmente usados, a los cuales les asignaron un puntaje de vulnerabilidad. En caso de que una construcción presente más de un sistema estructural, se recomendó asignar el índice con mayor valor para su evaluación.

Por esta razón, fue necesario realizar la combinación de los métodos mencionados con las indicaciones de la NSR-10, por la similitud en la clasificación de los sistemas estructurales, logrando diseñar un formato para la recolección de información de las visitas en campo a las edificaciones de la ciudad de Tunja (Tabla 6).

Tabla 6. Valores del Índice de Vulnerabilidad según el formato FUNVISIS y NSR-10

Tipo de Estructura		Puntaje
Sistema de muros de carga	Muros de concreto armado en dos direcciones.	10
	Sistema industrializado de muros de concreto.	90
	Mampostería confinada.	80
	Mampostería Simple.	100
	Muros en adobe o tapia pisada en buenas condiciones o regulares.	90
	Muros en adobe o tapia pisada en malas regulares.	100

Tipo de Estructura		Puntaje
Sistema combinado	Sistemas mixtos de pórticos y de mampostería de baja calidad de construcción, con altura no mayor a 2 pisos.	90
	Sistemas mixtos de pórticos y de mampostería de baja calidad de construcción, con altura mayor a 2 pisos.	100
	Sistemas mixtos de pórticos y de mampostería de calidad intermedia de construcción, con altura no mayor a 2 pisos.	70
	Sistemas mixtos de pórticos y de mampostería de calidad intermedia de construcción, con altura mayor a 2 pisos.	80
Sistema de pórticos	Pórtico de concreto armado.	15
	Pórticos de concreto armado rellenos con paredes de concreto.	10
	Pórtico de acero.	10
	Pórticos de acero con perfiles tubulares.	20
	Pórticos de acero diagonalizados.	20
	Pórticos de acero con cerchas.	30
Sistema dual	Sistemas prefabricados en base de grandes paneles o de pórticos.	90

Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). *Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente.* 29, 107–126 y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10* (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, Ed.).

2.2.2.2 Índice de Vulnerabilidad asociado a las irregularidades

Las irregularidades modifican la vulnerabilidad de una edificación aumentándola por las irregularidades geométricas en planta o en altura que puedan presentar; así, como evidenciar alguna

deficiencia estructural relevante que modifique su desempeño ante un sismo. Se definieron 11 irregularidades reconocidas a nivel internacional y que son desfavorables ante respuestas sísmicas, definiendo un índice de irregularidad que debe ser menor o igual a 100 (Tabla 7); por tal motivo, se pueden sumar varias irregularidades, sin superar este límite, o seleccionar la más crítica.

Tabla 7. Índice de Vulnerabilidad asociado a la irregularidad

Descripción de la Irregularidad	I_3
Ausencia de vigas altas en una o dos direcciones.	60
Ausencia de muros en una dirección, como ocurre en algunos sistemas del tipo túnel.	80
Edificios de carácter frágil, sin capacidad para disipar energía, como lo son las edificaciones de adobe o de paredes de bloques que no poseen refuerzo metálico interior ni elementos de confinamiento (columnas, vigas de corona).	100
Presencia de al menos un entrepiso blando o débil.	60
Presencia de columnas cortas.	50
Discontinuidad de ejes de columnas o paredes portantes.	70
Aberturas significativas en losas.	20
Fuerte asimetría de masas o rigideces en planta o esquemas de elevación del tipo L.	70
Adosamiento Losa contra losa.	40
Adosamiento Losa contra columna.	40
Planta de forma I, H, T, U, C o similar, sin presencia de juntas, o esbeltez excesiva horizontal.	40

Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 29, 107-126.

2.2.2.3 Índice de Vulnerabilidad asociado a la profundidad del depósito

Permite tomar en cuenta el aumento en la vulnerabilidad de una edificación alta, que esté construida sobre sedimentos de gran profundidad, tal como quedó evidenciado en el terremoto de Caracas de 1967 (Comisión Presidencial, 1969; Seed et al., 1972). En la Tabla 8, se definen los valores.

Tabla 8. Valores del Índice de Vulnerabilidad asociado con la profundidad del depósito

Situaciones de aplicación	I_4
Edificios con un número de pisos que 6 y localizados en depósitos de sedimentos de profundidad mayor a 120 metros.	100
Otros casos.	0

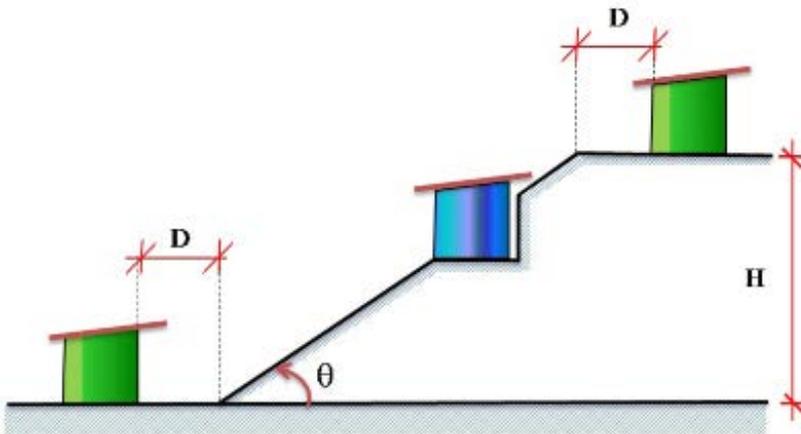
Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V, 29, 107-126.

2.2.2.4 Índice de Vulnerabilidad asociado a la topografía

Busca identificar situaciones de vulnerabilidad asociadas con construcciones ubicadas en laderas o cerca de estas, vulnerabilidad que se define con base en una potencial falla de estabilidad en taludes no protegidos por obras de contención.

En la Tabla 9, se presentan los valores del I_5 , los cuales dependen del ángulo de inclinación de la ladera o talud (θ), de la altura de la ladera (H) y de la distancia (D), estas variables se definen en la Figura 10.

Figura 10. Construcciones en las cuales se considera vulnerabilidad asociada a la topografía



Nota. López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V*, 29, 107-126.

Tabla 9. Valores de Índice de Vulnerabilidad asociados a la Topografía

Localización de la construcción	Características	I_5
Construcción sobre planicie:	-	5
Construcción sobre ladera con pendiente de ángulo θ dada por:	Entre 20° y 45°	50
	$\geq 45^\circ$	80
Construcción sobre la cima o en la base de la ladera de pendiente θ $\geq 20^\circ$, a una distancia D:	Menor o igual a H	80
	Mayor a H	0

Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V*, 29, 107-126.

2.2.2.5 Índice de Vulnerabilidad asociado al grado de deterioro

Para una edificación que presente columnas o vigas con deterioro estructural, es propensa a un colapso, por lo cual, se tiene en cuenta para este índice específico una escala de severo, moderado y grave; por medio de la evaluación rápida visual (RVS), un valor

máximo de 100 para una estructura que evidencie deterioros notorios en sus componentes estructurales.

En la Tabla 10, se muestran los valores de I_6 asignados a diferentes grados de deterioro, penalizando con los mayores valores, la existencia de corrosión del acero y al agrietamiento estructural.

Tabla 10. Valores del Índice de Vulnerabilidad asociado al grado de deterioro

Componente	Grado de deterioro	I_6	
Estructura	Estructura de concreto: Arietamiento en elementos estructurales de concreto armado y corrosión en acero de refuerzo.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0
	Estructura de acero: Corrosión en elementos de acero y deterioro de conexiones o pandeo de elementos.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0
Paredes	Arietamiento en paredes de relleno.	Severo	40
		Moderado	20
		Ninguno	0
Todos	Estado general de mantenimiento.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0

Nota. Adaptado a partir de López, O. A., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existente. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V*, 29, 107–126.

2.3 Metodología AHP para la asignación de ponderados de los Índices de Vulnerabilidad específicos

2.3.1 Evaluación Multicriterio

La toma de decisión es un proceso habitual y fundamental en las actividades cotidianas de todo ser humano, independientemente del contexto o la complejidad en el que se desarrolle (Vergara

& Santiago, 2010). Como señaló Herbert Simón (1977), En gran medida, la conducta humana se caracteriza por una racionalidad tan solo parcial, dado que un considerable número de acciones se ve influenciada por componentes emocionales o, incluso, irracionales. Estos comportamientos irracionales, resultan en ocasiones de las limitaciones que tienen los seres humanos para realizar una evaluación de alternativas cuando se presentan varios criterios.

La toma de decisiones en la ingeniería es un proceso fundamental que se desarrolla dentro de la conformación de los proyectos, involucrando cierto grado de complejidad y trascendencia en la realización de los mismos. Esta toma de decisión constante, conlleva cierta tensión psicológica por parte de quienes adquieren la responsabilidad de tomarla, ya sea por el riesgo a afectar y perder el prestigio y la autoestima, o a las consecuencias materiales y sociales.

La búsqueda de un método para tomar una decisión ideal y solucionar lo anteriormente nombrado, ha sido de preocupación constante por parte de los profesionales y estudiosos; es por lo anterior, que surge la iniciativa de la conformación de la llamada Toma de Decisiones con Criterios Múltiples (MCDM, por sus siglas en inglés) o Evaluación Multicriterio (EMC), la cual se compone de 3 elementos genéricos que interactúan en cualquier problema de decisión multicriterio: 1. Tomador/res de decisiones. 2. Alternativas y 3. Criterios (Malczewski, 2018).

La MCDM, es una herramienta valiosa y útil para los responsables de la toma de decisiones, ya que estos se enfrentan a numerosas y conflictivas alternativas. Asimismo, la MCDM, permite obtener una selección racional y una solución óptima basada en información y en el juicio sobre los criterios elegidos para cada fase de un proyecto, ya que esta, considera factores de tipo cuantitativo y cualitativo, así como tiene en cuenta la pluralidad de los actores involucrados en el proceso de toma de decisiones (Tzeng & Huang, 2011). Se entiende que cuando se toma una buena decisión, además del hecho de haberse tomado con el mejor procedimiento disponible, los resultados se mostrarán favorables.

2.3.2 Clasificación de los Métodos MCDM

El proceso de toma de decisiones puede realizarse aplicando diferentes herramientas y métodos, así como utilizando otros objetivos. Para facilitar la investigación sistemática en el campo de los métodos MCDM, Hwang y Yoon (1981) los dividieron en Toma de Decisiones de Atributos Múltiples (MADM, por sus siglas en inglés) y Toma de Decisiones de Objetivos Múltiples (MODM, por sus siglas en inglés).

Los métodos MADM, se aplican en la faceta de evaluación de un proyecto y se utilizan para valorar problemas discretos, asociados a un número limitado de alternativas predeterminadas; además, se trata de un proceso “a priori”, en donde los expertos participan en la fase inicial del proceso, indicando las ponderaciones o importancia de cada criterio, obteniendo la mejor solución o el ranking de soluciones. Por otro lado, los métodos MODM, se aplican en la faceta de diseño/planificación de un proyecto, son utilizados para resolver problemas continuos en donde las alternativas no están predeterminadas, pues, son grupos de soluciones que se consideran igualmente buenas y que están sujetas a una serie de restricciones, este es un proceso “a posteriori” en donde los expertos participan en la parte final eligiendo una de las soluciones (Penadés-Plà et al., 2016) (Tzeng & Huang, 2011).

Con base en lo anterior, para el estudio, se elige el método MADM, ya que el problema se enfoca en un número de alternativas limitadas (Índices de Vulnerabilidad Específicos (I_j)) y además, es un proceso en el que el panel de expertos participa en la fase inicial, para indicar los ponderados de dichos índices como se muestra más adelante.

Según Hajkwociz y Collins (2007) De Brito y Evers (2016) y Greco, Figueroa y Ehr Gott (2016), los métodos MADM, pueden clasificarse en diferentes grupos según características similares. Dentro de estos grupos se encuentran los métodos de Comparación por Pares (Pairwise Comparison Methods), los cuales son muy útiles para obtener el peso de los distintos criterios y comparar alternativas con respecto a un criterio subjetivo. Estos métodos se basan en el conocimiento de los decisores. Conjuntamente, es posible que

distintos responsables de la toma de decisiones, tengan variados puntos de vista sobre el mismo problema. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), el Proceso Analítico de Redes (ANP) y el método de Medición del Atractivo Mediante una Técnica de Evaluación Basada en Categorías (MACBETH) hacen parte de este grupo.

2.3.3 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

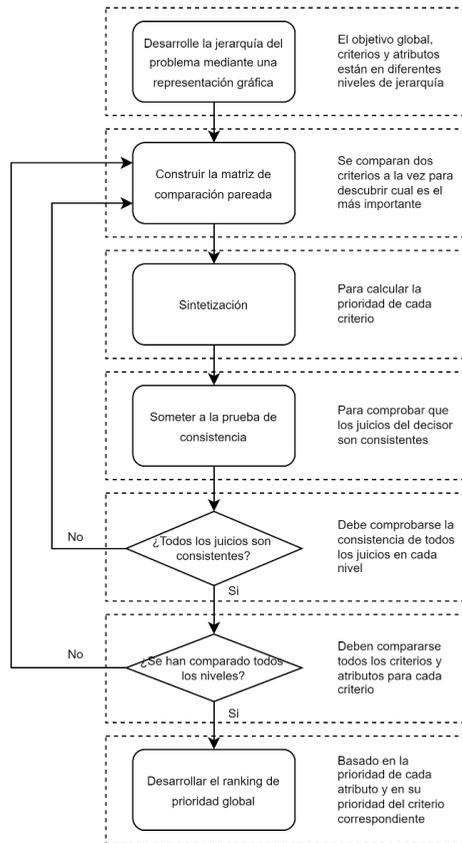
El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), fue desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1970, mientras ejercía en la Universidad de Pennsylvania. Según Saaty, El Proceso de Jerarquía Analítica representa un modelo estratégico para la toma de decisiones, proporcionando una herramienta esencial para abordar las decisiones multifacéticas inherentes a la complejidad de nuestro mundo actual. (T. L. Saaty, 1988). Según el autor, el AHP, en su forma general, “El Proceso de Jerarquía Analítica es un marco no lineal que facilita la implementación del pensamiento deductivo e inductivo sin recurrir al silogismo. Al considerar múltiples factores simultáneamente, permite la interdependencia y retroalimentación entre ellos, además de realizar ajustes numéricos. De este modo, se llega a una síntesis o conclusión de manera efectiva y equilibrada, capturando la complejidad inherente en el proceso de toma de decisiones.” (Saaty, 1987). Se trata de un proceso que involucra cuatro axiomas que utilizan la noción de comparaciones por pares como primitiva (T. L. Saaty, 1986). Vargas (1990), presenta de manera sintetizada los axiomas básicos en los que se fundamenta la teoría del AHP:

- Comparación recíproca: “El decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza o intensidad de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición de reciprocidad: Si A es x veces más preferido que B , entonces B es $1/x$ veces más preferido que A ”.
- Homogeneidad: “Las preferencias se representan por medio de una escala limitada y acotada”.
- Independencia: “Cuando se expresan preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas”.

- Expectativas: “Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa”.

Vistas las ideas y los fundamentos teóricos en las que se basa la filosofía del AHP, a continuación, se incluyen las etapas de la metodología propuesta por Saaty (1994) en su formulación inicial, las cuales se amplían en la Figura 11, así:

Figura 11. Diagrama de flujo del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)



Nota. Ho, W., Dey, P. K., & Higson, H. E. (2006). Multiple criteria decision-making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*.

2.3.4 Implementación del AHP para Establecer el Índice de Vulnerabilidad de las edificaciones en la zona urbana del municipio de Tunja

Contrario a los rigurosos fundamentos matemáticos del AHP, este sigue cumpliendo ciertos criterios de simplicidad para ser utilizado. Algunas de las ventajas y razones que se encuentran del método AHP (García Cascales, 2009) (T. L. Saaty, 1994) y que permitieron escoger esta como herramienta de decisión multicriterio para los responsables de la toma de decisiones son:

- Teoría: El AHP, es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica.
- Práctica: El AHP, es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene.
- Unidad: El AHP, proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados.
- Complejidad: El AHP, integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos.
- Estructura jerárquica: El AHP, refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel.
- Medida: El AHP, proporciona una escala para medir y un método para esclarecer prioridades.
- Síntesis: El AHP, conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa.
- Compensaciones: El AHP, toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa en virtud de objetivos.
- Juicio y consenso: El AHP, no insiste en el consenso, pero, sintetiza un resultado representativo de diversos juicios.
- Repetición del proceso: El AHP, permite que la gente afine su definición de un problema y mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

El objetivo de la implementación de la metodología AHP en el estudio, es establecer el valor del peso relativo para cada Índice

de Vulnerabilidad específico (I_i) presentado en la metodología del FUNVISIS, con el fin de calcular el Índice de Vulnerabilidad (I_V) de las edificaciones en la zona urbana del municipio de Tunja y definido en la ecuación del apartado anterior.

Una vez aclarada la base teórica y fundamental del AHP y viendo las virtudes que este presenta como metodología de evaluación multicriterio, se decide implementar la hoja de cálculo que se obtuvo a través del Business Performance Management Singapore (BPMSG) desarrollado por el Doctor Klaus Goepel (2013), que ha sido efectuada en proyectos investigativos como “Aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Evaluación multicriterio en la determinación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja” (Gualdrón et al., 2020 Pág. 15), que ha dejado experiencias positivas de primera mano, y con esta, ha sido posible realizar el cálculo mediante la metodología del APH de los pesos relativos para cada Índice de Vulnerabilidad Específico (I_i).

Para utilizar la hoja de cálculo, inicialmente, se ingresan en los campos especificados en la hoja de resumen los siguientes datos de entrada (Figura 12):

- Número de criterios: que en este caso son los seis Índices de Vulnerabilidad Específicos (I_i). La hoja de cálculo permite introducir el nombre de los criterios y un comentario para cada criterio si es necesario.
- Escala: la hoja de cálculo maneja las escalas: 1. AHP (1-9), 2. Logarítmica, 3. Raíz Cuadrada, 4. Inversa lineal, 5. Equilibrado-n (escala equilibrada corregida), 6. Potencial, 7. Geométrica y 8. Adaptable. Se escoge por defecto la escala 1, escala AHP lineal estándar de 1 a 9 que se aborda en la metodología.
- Número de participantes (N): con fin de realizar la evaluación por pares de cada Índice, se implementó la herramienta “Survey123 for ArcGIS”, que forma parte de la nube geoespacial de Esri (Environmental Systems Research Institute), la cual permite crear, compartir y analizar encuestas. Con esta herramienta fue posible generar un formulario dirigido

- a 11 profesionales especialistas en el área de estructuras y materiales, con el fin de que estos proporcionaran a juicio, como expertos, un valor que abarca la escala evaluativa de 1 a 9, según la escala de comparación pareada de Saaty, a los Índices de Vulnerabilidad Específicos (I_i), teniendo en cuenta las condiciones particulares del municipio de Tunja.
- Alfa (α): umbral de aceptación de la incoherencia. El autor recomienda un valor de 0,1. El campo de consenso es un campo de salida que muestra el índice de consenso AHP, si tiene más de un responsable de la toma de decisiones/participante. El indicador de consenso oscila entre el 0% (sin consenso entre los responsables de la toma de decisiones) y el 100% (consenso total entre los responsables de la toma de decisiones).
 - Participante seleccionado (p): En el caso de más de un participante, la hoja de cálculo permite seleccionar el resultado del participante que se mostrará. Los participantes se numeran del 1 al 11 según las hojas de entrada para las comparaciones por pares. Si se selecciona 0, se mostrará el resultado consolidado de todos los participantes, utilizando la media geométrica de todas las matrices de decisión.
 - Objetivo: texto para describir el proyecto.
 - Autor y Fecha: datos que permiten identificar al investigador y la fecha en la cual se realizó el estudio.

Figura 12. Datos de entrada ingresados en la hoja de cálculo

http://bpmsg.com AHP 10/11/2022

AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs)
 K. D. Goepel Version 15.09.2018 Free web based AHP software on: <http://bpmsg.com>
Only input data in the light green fields and worksheets!

n=	6	Number of criteria (2 to 10)	Scale:	1	AHP 1-9
N=	11	Number of Participants (1 to 20)	α :	0.1	72.5%
p=	0	selected Participant (0=consol.)	2	7	Consolidated

Objective Establecimiento de los pesos relativos para cada índice de vulnerabilidad específico (Ii), para el cálculo del Índice de vulnerabilidad (Iv) de las edificaciones de la zona urbana de Tunja

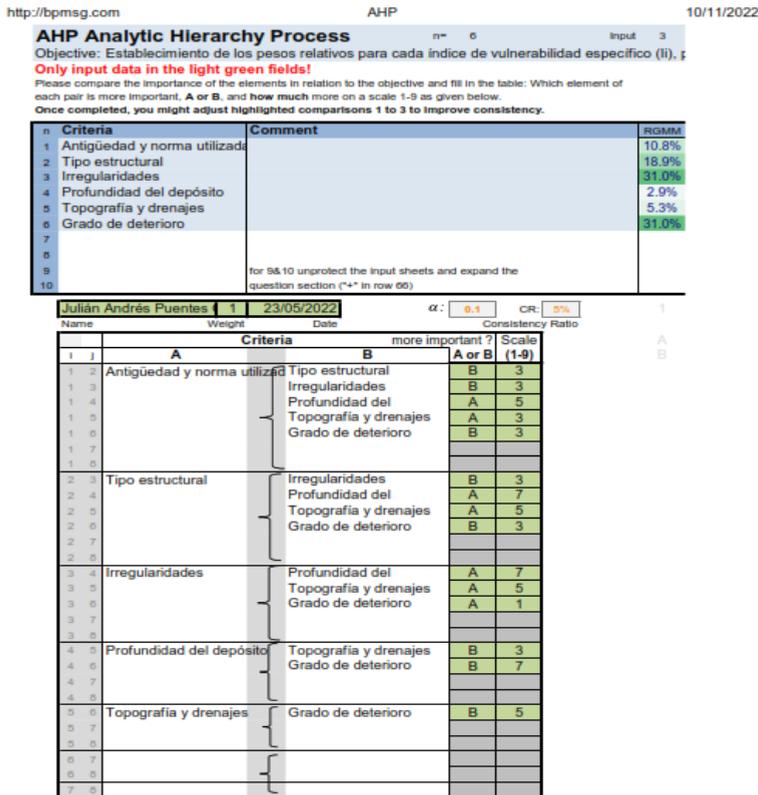
Author Santiago

Date 3-Jun-22 Thresh: 1E-08 Iterations: 5 EVM check: 1.5E-09

Nota. Autores a partir de la hoja de cálculo desarrollada por el Doctor Klaus

Una vez ingresados los datos iniciales, en cada hoja de trabajo de entrada para las comparaciones por pares, se introduce el nombre del responsable de la toma de decisiones/participante, un peso para su evaluación (que para este caso es un peso equivalente para todos los decisores) y una fecha. En la parte intermedia de la hoja cada participante, se realiza la evaluación de los criterios teniendo en cuenta la explicación previa de la escala y metodología, designando el grado de favorecimiento o perjuicio de un elemento sobre el otro. Cada hoja de entrada muestra las prioridades resultantes calculadas partiendo de las comparaciones particulares de cada participante basadas en el método de la media geométrica de las filas (RGMM, por sus siglas en inglés). Lo anterior, se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Ejemplo hoja de evaluación pareada por participante



Nota. Autores a partir de la hoja de cálculo desarrollada por el Doctor Klaus Goepel.

Finalmente, la herramienta pauta la tabla de resultados de todos los criterios con las ponderaciones y los errores calculados, utilizando el EVM, con lo cual fue posible obtener los valores para cada Índice de Vulnerabilidad Específico (I_j) como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de los Índices de Vulnerabilidad Específicos (I_j)

(I_j)	Vulnerabilidad asociada con	α_j
I_1	Antigüedad y norma utilizada	0.173
I_2	Sistema estructural	0.224
I_3	Irregularidades	0.189
I_4	Profundidad del depósito	0.071
I_5	Topografía y drenajes	0.094
I_6	Grado de deterioro	0.25

Nota. Autores.

Con lo anterior, se obtiene entonces, la ecuación final para el Índice de Vulnerabilidad de las viviendas de Tunja.

$$Iv = \sum_{i=1}^6 \alpha_i I_i \quad (3)$$

$$Iv = 0.173I_1 + 0.224I_2 + 0.189I_3 + 0.071I_4 + 0.094I_5 + 0.250I_6 \quad (4)$$

2.4 Recolección de información en campo

La recolección de información en campo, se generó a través de un aplicativo web, vinculado a la aplicación Survey123, el cual forma parte de la nube geoespacial de las aplicaciones de ArcGis, la cual permite crear, compartir y analizar formularios inteligentes, por medio de dispositivos móviles que facilitan la captura de información.

A partir de la obtención de los índices de vulnerabilidad y la adaptación de la ecuación propuesta por FUNVISIS, se realizó la estructura del aplicativo web que vincula cada criterio de vulnerabilidad sísmica, como se observa en la descripción de la Figura 14.

Figura 14. *Aplicativo web “Vulnerabilidad sísmica SIG” – Índices de vulnerabilidad*



- Descripción de la estructura:
 - Número de pisos
 - Vetustez
- Localización
 - Topografía
- Estructura
 - Tipo de estructura
 - Irregularidades
 - Grado de deterioro concreto, acero, paredes, estructura.

Nota. Autores.

Sumando a esto, se vinculó información general relevante dentro del aplicativo como se visualiza en la Figura 15.

Figura 15. *Aplicativo web “Vulnerabilidad sísmica SIG” – Información general*



- Componente General
 - Nombre del evaluador
 - Fecha y hora de evaluación
- Localización
 - Coordenadas
- Registro fotográfico
 - Fachada
 - Estructura
 - Problemática (Opcional)

Nota. Autores.

Esta información general se describe detalladamente a continuación:

- **Nombre del evaluador:** se refiere al profesional que realizó la toma de la información en campo con el fin de evaluar el grado de certeza de esta y, según los métodos de validación descritos en el apartado de validación de datos.
- **Fecha y hora:** define el momento en el que fue tomada la información, esto permite realizar una comparación a futuro por medio de un análisis multitemporal.
- **Localización:** indica las coordenadas de cada una de las estructuras evaluadas por medio de la georreferenciación de un archivo de forma tipo punto.
- **Registro fotográfico:** permite validar la información recolectada en campo con el fin de evaluar si los valores consignados en los Índices de Vulnerabilidad son correctos.

Con la integración de los Índices de Vulnerabilidad e información general, se realizan pruebas piloto para evaluar la confiabilidad de

la herramienta, en lo que refiere con la precisión de la georreferenciación y la estandarización de conceptos de los evaluadores. Una vez culminada esta etapa, e iniciando con catastro (Figura 16), el cual refiere que existen 45.754 predios de los cuales 39.454 corresponden a predios que tienen algún tipo de estructura, se seleccionó el tamaño de la muestra en un 15% que corresponde 5.942 construcciones.

Figura 16. Catastro casco urbano ciudad de Tunja



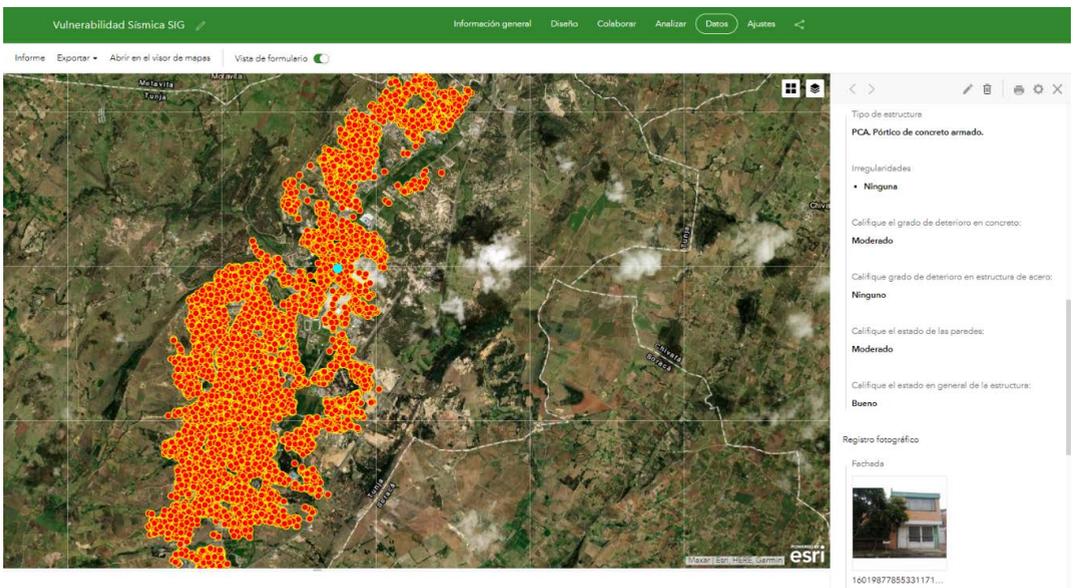
Nota. Autores con base en el catastro de la ciudad de Tunja.

Para que la distribución de los puntos fuera homogénea y aleatoria en todo el casco urbano del municipio, se utilizó la herramienta de geoprocresamiento del software ArcGIS denominada “Create Random Points”, que crea puntos aleatorios dentro de las entidades de polígonos empezando con una secuencia de número aleatoria, y con base en los polígonos existentes. A partir de esta información, se migra a un formato .xls (Excel) y con la función “aleatorio_entre” se seleccionan las 5.942 construcciones.

Una vez seleccionadas las construcciones a ser evaluadas, se procede a realizar la Evaluación Rápida Visual (RVS) en campo, por medio de la herramienta web. Lo que permite identificar la infraestructura, de acuerdo con los criterios de vulnerabilidad y evaluar la potencialidad de peligrosidad ante un evento sísmico, todo esto, en tiempo real y georreferenciado.

La recolección de datos se realiza en los 10 sectores de la ciudad con cuatro frentes de trabajo distribuidos en cada punto cardinal. A medida que se realizaba la recolección de información, se hace la validación de puntos por medio de la herramienta de análisis de Survey123 (Ver Figura 17).

Figura 17. Puntos tomados en campo herramienta de análisis Survey123



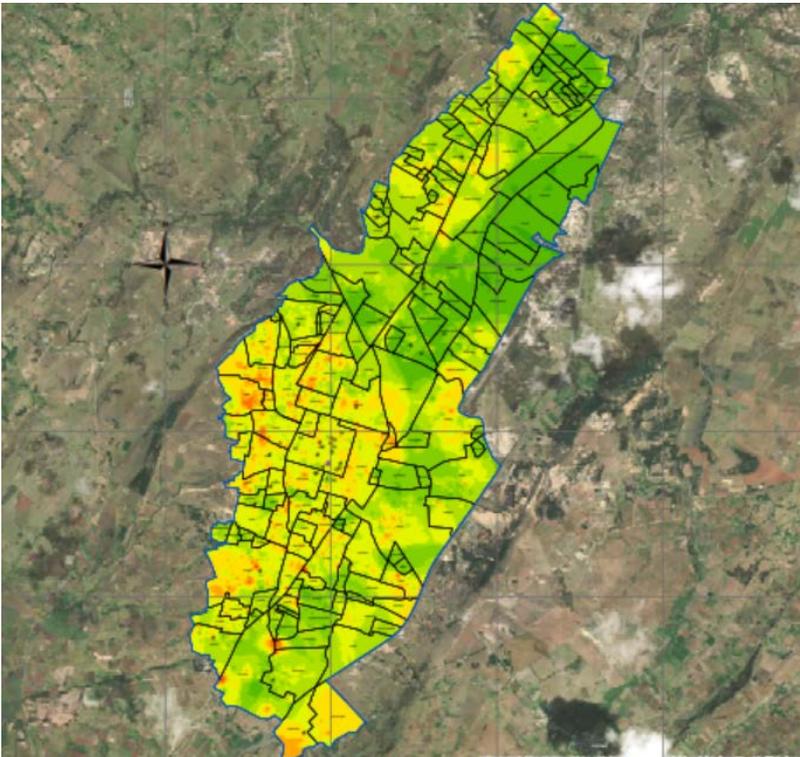
Nota. Autores.

A partir de la información recolectada en campo, se procedió a vincular dicha información a la catastral por medio de amarres espaciales y así realizar la extrapolación de valores por medio de métodos de interpolación ráster:

- IDW
- Kriging

El método de interpolación IDW, se caracteriza por tener núcleos con concentración (Ver Figura 18), y valores elevados de vulnerabilidad, esto se debe a la asignación de pesos basados en la distancia entre los puntos. Lo que indica que mantiene los valores registrados en ArcGIS, pero para el caso de estudio, se debe tener en cuenta la independencia de cada edificación estudiada.

Figura 18. Ráster método de interpolación IDW

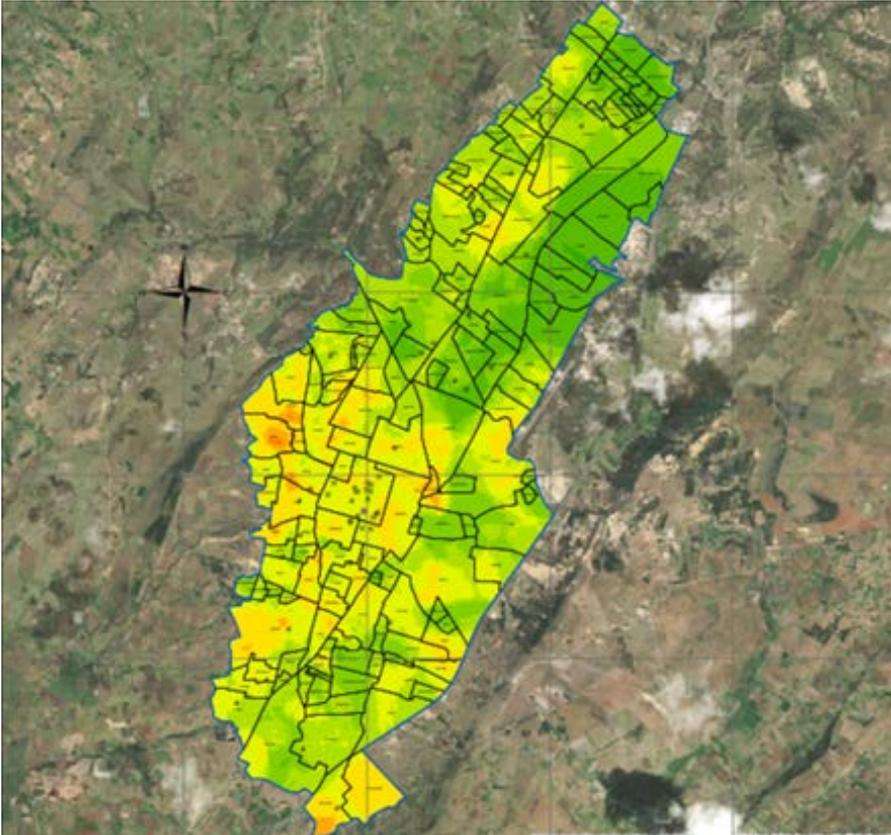


Nota. Autores.

Por otro parte Kriging, aunque también sea un método de interpolación, a diferencia del método por IDW, es un método netamente estadístico, lo que se vería reflejado en variaciones en los valores de los puntos evaluados, conglomerando en una zona específica

un conjunto de puntos con un valor de Índice de Vulnerabilidad similar en una determinada área. Como se observa en la Figura 19., solo se generan manchas en zonas específicas con criticidad de los Índices de Vulnerabilidad en zonas cercanas.

Figura 19. *Ráster método de interpolación Kriging*



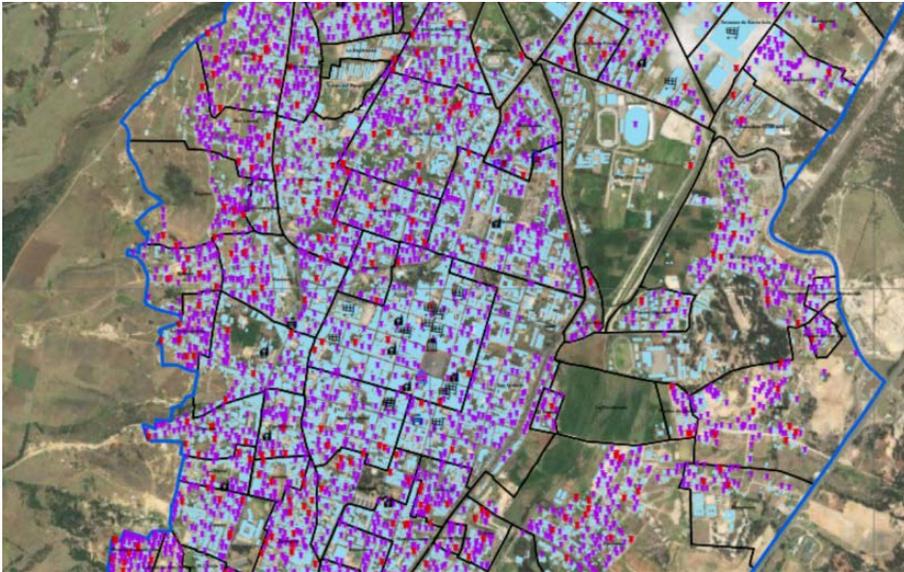
Nota. Autores.

2.5 Validación estadística de los Ráster IDW y Kriging

Para los ráster realizados, se llevó a cabo una validación eliminando el 10% de los puntos residenciales evaluados aleatoriamente, y determinar cuál tiende a tener una mayor variación con respecto a sus valores de vulnerabilidad originales, y de esa forma, tener un criterio para comparar las metodologías de interpolación.

La elección para eliminar los puntos aleatoriamente, se hizo por medio del programa Excel, se enumeraron los 594 puntos correspondientes al 10% de la muestra total de 5.942 y en otra columna, se utiliza la función “aleatorio, entre”, en la que se define el rango de valores; en este caso, la muestra total de edificaciones estudiadas, así, se definieron los puntos a eliminar del ráster para ver los cambios que sufren con su ausencia en la interpolación. En la Figura 20, se observa un fragmento de la distribución de los puntos seleccionados en la ciudad de Tunja.

Figura 20. Fragmento de la ubicación de las edificaciones residenciales inspeccionadas para la validación de los ráster



Nota. Autores.

Se generaron de nuevo los ráster eliminando los mismos puntos para cada una de las metodologías de interpolación, con el fin de identificar el cambio que presenta el Índice de Vulnerabilidad sísmica. Debido a que cada ráster tiene un valor establecido en campo, al eliminar los puntos en ArcGIS, se le da el valor correspondiente según el método de interpolación, exportando el resultado de los ráster a los puntos eliminados.

Se hizo una comparación de los valores originales de la recolección de campo con los resultados exportados de los ráster a los puntos eliminados. Se analiza la variación de los resultados en el método de interpolación IDW y Kriging, con base al Índice de Vulnerabilidad, por medio de una hoja de Excel en el que se agruparon los datos obtenidos; así las cosas, se realizó un análisis estadístico en cada una de ellos, para demostrar cuál tiene un cambio menor respecto a sus valores originales y su probabilidad de ocurrencia.

2.5.1 Validación Estadística del Ráster por el Método de Interpolación IDW

El análisis estadístico se hizo midiendo la diferencia del valor real obtenido en campo con el de la interpolación del método IDW; se halló la frecuencia y la distribución normal en 20 intervalos de 5 en 5, iniciando en -60 y terminando en 40, por lo que los resultados obtenidos no sobrepasan esos valores (Tabla 12).

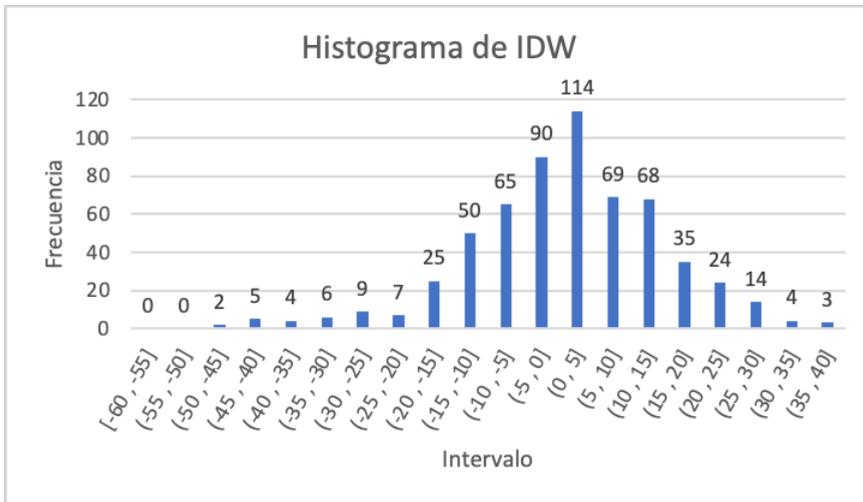
Tabla 12. Valores de frecuencia y distribución normal de los datos de validación para el método IDW

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia	Distribución Normal
[-60, -55]	-60	-55	0	0.0000
(-55, -50]	-55	-50	0	0.0000
(-50, -45]	-50	-45	2	0.0000
(-45, -40]	-45	-40	5	0.0001
(-40, -35]	-40	-35	4	0.0003
(-35, -30]	-35	-30	6	0.0009
(-30, -25]	-30	-25	9	0.0022
(-25, -20]	-25	-20	7	0.0048
(-20, -15]	-20	-15	25	0.0090
(-15, -10]	-15	-10	50	0.0147
(-10, -5]	-10	-5	65	0.0212
(-5, 0]	-5	0	90	0.0266
(0, 5]	0	5	114	0.0292

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia	Distribución Normal
(5, 10]	5	10	69	0.0280
(10, 15]	10	15	68	0.0235
(15, 20]	15	20	35	0.0172
(20, 25]	20	25	24	0.0110
(25, 30]	25	30	14	0.0062
(30, 35]	30	35	4	0.0030
(35, 40]	35	40	3	0.0013

Nota. Autores.

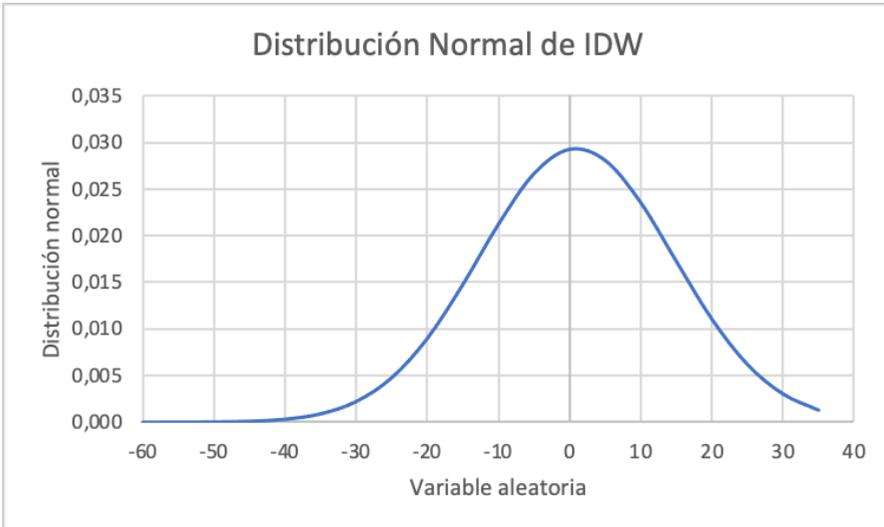
Gráfica 1. Histograma del método IDW



Nota. Autores.

De acuerdo a la Gráfica 1, las frecuencias obtenidas en cada uno de los intervalos contaron con un histograma, que muestra que, entre los valores -20 a 25 hay una gran agrupación de datos, por lo tanto, se entiende que la variación que tiene el Índice de Vulnerabilidad esta entre ± 25 , equivalente al 91% de los datos obtenidos, aproximadamente. La relación que se presenta en la gráfica, consiste en que los valores positivos representan un aumento en el valor original de los datos con el método de interpolación evaluado y los valores negativos una disminución del mismo.

Gráfica 2. *Distribución normal del método IDW*



Nota. Autores.

Por la evidencia de la Gráfica 2., referente a la distribución normal, es muy baja la probabilidad de que haya un cambio significativo en los Índices de Vulnerabilidad, por la agrupación de variables debajo de la curva de ± 25 , el cual coincide con el rango expuesto en el histograma anterior. Por tal motivo, el ráster sin el 10% de puntos conserva una gran similitud con el original.

2.5.2 Validación Estadística del Ráster por el Método de Interpolación Kriging

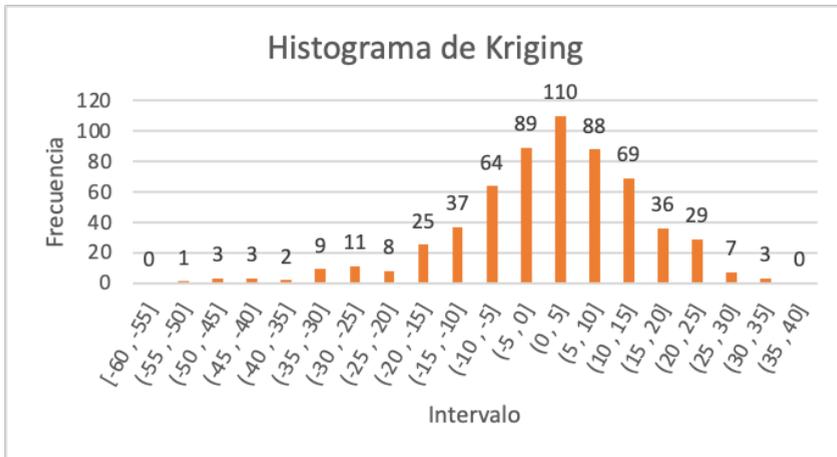
La validación del ráster para el método de interpolación Kriging, se hace del mismo modo que en el IDW, utilizando los mismos intervalos para tener una correlación entre las metodologías según el valor de frecuencia y distribución normal (Tabla 13).

Tabla 13. *Valores de frecuencia y distribución normal de los datos de validación para el método Kriging.*

Intervalo	L.I.	L.S.	Frecuencias	Distribución Normal
[-60, -55]	-60	-55	0	0.0000
(-55, -50]	-55	-50	1	0.0000
(-50, -45]	-50	-45	3	0.0000
(-45, -40]	-45	-40	3	0.0001
(-40, -35]	-40	-35	2	0.0003
(-35, -30]	-35	-30	9	0.0008
(-30, -25]	-30	-25	11	0.0020
(-25, -20]	-25	-20	8	0.0045
(-20, -15]	-20	-15	25	0.0087
(-15, -10]	-15	-10	37	0.0147
(-10, -5]	-10	-5	64	0.0214
(-5, 0]	-5	0	89	0.0271
(0, 5]	0	5	110	0.0298
(5, 10]	5	10	88	0.0286
(10, 15]	10	15	69	0.0237
(15, 20]	15	20	36	0.0171
(20, 25]	20	25	29	0.0108
(25, 30]	25	30	7	0.0059
(30, 35]	30	35	3	0.0028
(35, 40]	35	40	0	0.0011

Nota. Autores.

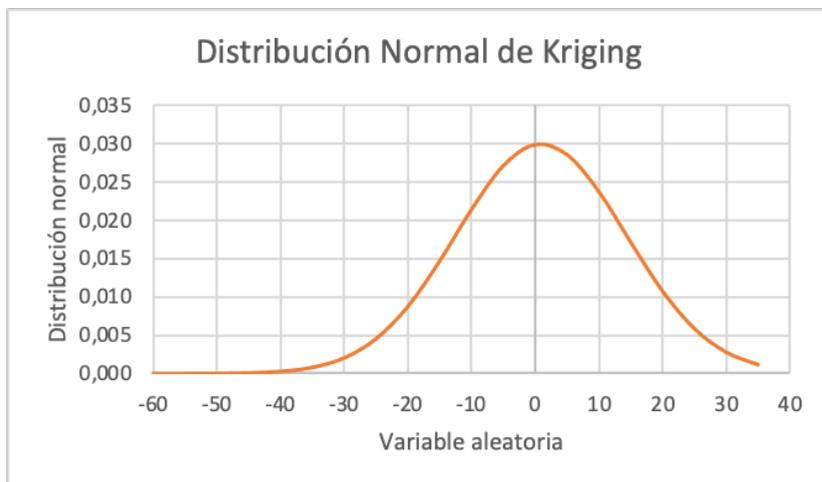
Gráfica 3. Histograma del método Kriging



Nota. Autores.

Los resultados que se muestra en el histograma de la Gráfica 3, son similares a los obtenidos por el método de interpolación IDW, el Índice de Vulnerabilidad está entre ± 25 , con la leve diferencia de que los datos corresponden a un 92%, aproximadamente, variando solo en un 1% con el método anterior.

Gráfica 4. Distribución normal del método Kriging



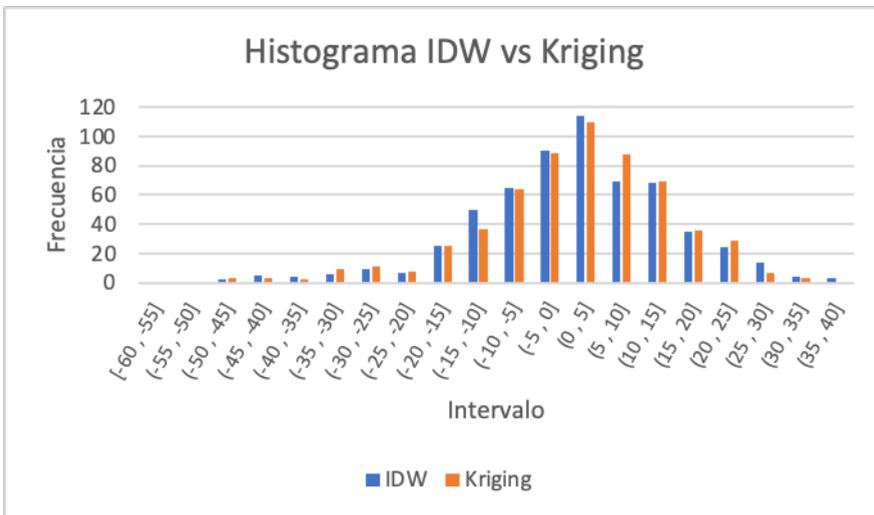
Nota. Autores.

En la Gráfica 4, la probabilidad de que existan valores de Índice de Vulnerabilidad cercanos a los iniciales entre el rango de ± 25 es alta, al igual que el método anterior. Por lo tanto, es poco probable que existan valores que superen ese rango, asumiendo una similitud con el ráster original.

2.5.3 Comparación de los Resultados Estadísticos de Idw y Kriging

Con cada uno de los resultados obtenidos en el estudio estadístico de las metodologías ráster se hace una comparación entre los histogramas y curvas de distribución normal.

Gráfica 5. Comparación de histogramas entre IDW y Kriging

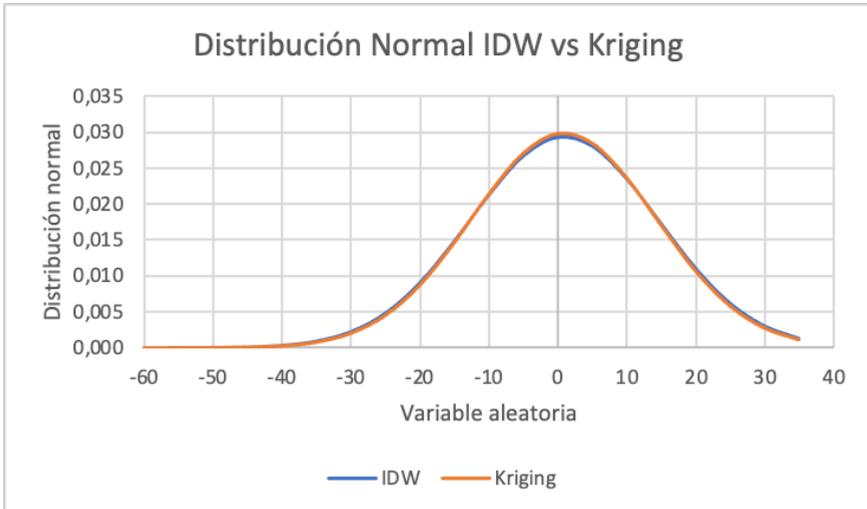


Nota. Autores.

Al comparar los histogramas del método de interpolación IDW y Kriging (Gráfica 5), se ve que no hay una diferencia notoria en la variación de las frecuencias de los intervalos, en el caso de los valores que se encuentran en los intervalos (-25, -20] y (5, 10] son los únicos que tienen una diferencia notoria en la cantidad de la frecuencia, con una diferencia de 13 y 19 respectivamente. Por los intervalos anteriores, hay una mayor cantidad de datos a favor del método IDW en el primer intervalo; sin embargo, tiene mayor

relevancia el método Kriging, por lo que el otro intervalo es más favorable, debido a que su rango de valores está más cercano al índice de vulnerabilidad original.

Gráfica 6. Comparación de la distribución normal entre IDW y Kriging



Nota. Autores.

La comparación de las curvas de distribución normal (Gráfica 6), demuestran una similitud marcada en la desviación estándar, curtosis y asimetría. La única diferencia notable, está en la punta de la campana; en el método IDW, se encuentra por debajo 0.0001 de la curva por Kriging. La diferencia hace entender, que, la agrupación de los datos cercanos al valor original del Índice de Vulnerabilidad sea menor y los demás se distribuyan en la curva, pero, como la diferencia es mínima el cambio es irrelevante.

Por la similitud en la probabilidad en la variación de los valores de vulnerabilidad a los originales, el método estadístico no muestra una tendencia a algún método de interpolación en especial. Uno de los factores determinantes para la elección del método de interpolación es la criticidad que se muestre en los valores de los ráster, para abarcar cualquier evento posible. En el caso del IDW, tiene en cuenta los valores críticos que se presenten en las

estructuras evaluadas que son potencialmente vulnerables ante un sismo, por lo cual es apto para analizar con mayor precisión.

2.6 Validación de los polígonos residenciales

La validación de los Índices de Vulnerabilidad exportados por el método de interpolación IDW a las edificaciones residenciales de la ciudad, se hizo mediante una selección aleatoria utilizando el programa de Excel; de igual manera, que en la validación de los ráster IDW y Kriging, de las construcciones en la zona urbana de la ciudad y por medio de un formato de Survey123.

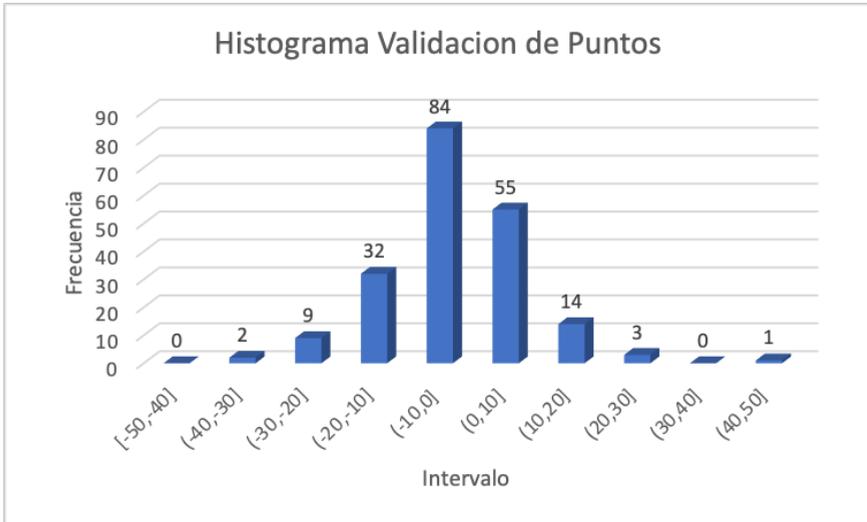
En la selección aleatoria de las edificaciones de la ciudad, se eligieron 200 polígonos distribuidos en toda la zona urbana; para confirmar su distribución, se utiliza el programa de ArcGIS, en el que se identifican los polígonos seleccionados por el número de identificación único.

A cada una de los polígonos seleccionados se le realizó el diligenciamiento del formulario a partir de la RVS, de forma eficiente por medio del Geovisor de la alcaldía, que cuenta con imágenes en 360° del año 2021. De esa forma, se tiene información actualizada de estado de las edificaciones seleccionadas.

Una vez definidos los valores reales, se hace una comparativa con los valores obtenidos por la interpolación del método IDW, para verificar si aumentan o disminuyen. Para eso, se hace un histograma con 10 intervalos de 10 en 10 del valor obtenido de la diferencia entre los Índices de Vulnerabilidad, iniciando en -50 y finalizando en 50, por lo que la diferencia no está por fuera del rango establecido.

Es importante resaltar, que, los valores negativos equivalen a una disminución de los valores interpolados por el método IDW respecto al valor real, y a los valores positivos, que equivalen a un aumento del mismo.

Gráfica 7. Histograma de la validación de los polígonos residenciales



Nota. Autores.

Según los resultados del Índice de Vulnerabilidad, en la Gráfica 7, el 70% de los datos tienen una diferencia del valor original de ± 10 , el 30% restante son valores con una diferencia del Índice de Vulnerabilidad que superó a 10. Por lo tanto, existen edificaciones con una vulnerabilidad elevada en sectores con Índices de Vulnerabilidad bajos.

El análisis de cada Índice de Vulnerabilidad, específicamente los índices asociados a la antigüedad, el sistema estructural, las irregularidades, la topografía y el deterioro, las edificaciones tienen valores cercanos a los reales; sin embargo, existen algunos, en los que los resultados varían en gran medida, con relación a los valores originales, debido a que cada uno cambia, ya sea aumentando o disminuyendo su valor, se contrarrestan entre sí para el cálculo final del Índice de Vulnerabilidad dando valores cercanos al real.

2.7 Análisis y discusión

2.7.1 Índice de Vulnerabilidad Asociado al Deterioro

Permite establecer a partir de una inspección visual, si una estructura es propensa a colapsar en función del deterioro estructural presentado en paredes, vigas, columnas y estado general, se lleva a cabo una valoración cuantitativa definida como 0 para estructuras en muy buen estado y 80 para aquellas con deterioro severo. La Tabla 14, presenta los valores para el índice de deterioro asignados en la presente investigación.

Tabla 14. Índice de deterioro.

COMPONENTE	GRADO DE DETERIORO	CLASIFICACIÓN	VALOR ÍNDICE
Estructura	Estructura de concreto: Agrietamiento en elementos estructurales de concreto armado o corrosión en acero de refuerzo.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0
	Estructura de acero: Corrosión en elementos de acero y deterioro de conexiones o pandeo de elementos.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0
Paredes	Agrietamiento en paredes de relleno.	Severo	40
		Moderado	20
		Ninguno	0
Estado General	Estado general de mantenimiento.	Severo	80
		Moderado	40
		Ninguno	0

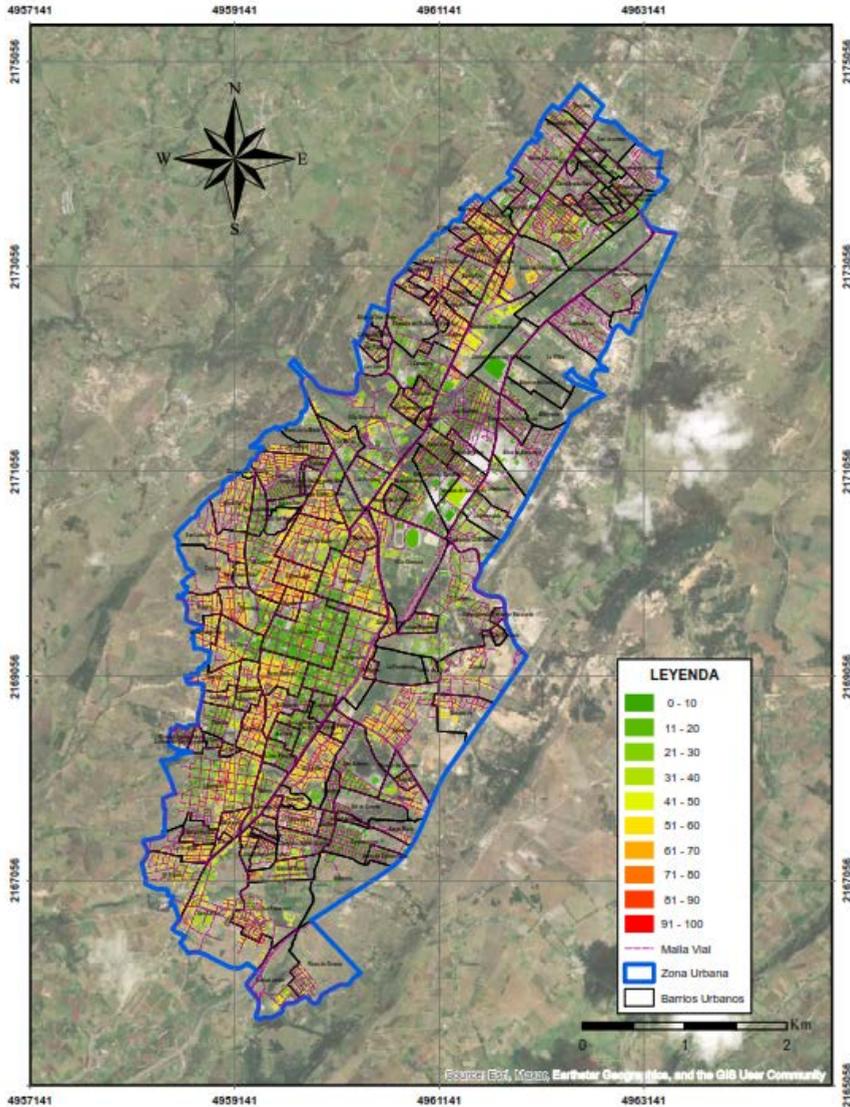
Nota. Autores.

El análisis espacial del índice de deterioro definido para la ciudad de Tunja, puede ser observado en la Figura 21, donde hay construcciones dispersas con altos valores puntuales en el índice de deterioro, los cuales no necesariamente se encuentran

relacionados con la antigüedad, y se refleja en el casco histórico de la ciudad, en la que a pesar de contener las construcciones más antiguas, sus valores de índice de deterioro son bajos, debido posiblemente a los Planes Especiales de Manejo y Protección (PEMP), en los que se realizan mantenimientos periódicos a las edificaciones coloniales.

En general, se puede apreciar que los sectores de la ciudad que han presentado un desarrollo urbanístico por planes parciales tales como Mesopotamia, Santa Inés, Rosales, entre otros, tienden a mostrar un índice de deterioro bajo, así como barrios de construcción reciente, como es el caso de Las Quintas, mientras que las áreas que se han desarrollado sin una planeación urbanística presentan valores altos o moderados de este índice, los cuales se localizan principalmente en el sector occidental de la ciudad, como es el caso de los barrios Veinte de Julio, Santa Lucía, Kennedy y San Lázaro. Finalmente, se pudo considerar, que, para los sectores localizados por fuera del casco histórico de la ciudad, se evidencia de manera general, una relación directa entre la antigüedad de las viviendas y el grado de deterioro de las mismas.

Figura 21. Distribución espacial índice de deterioro



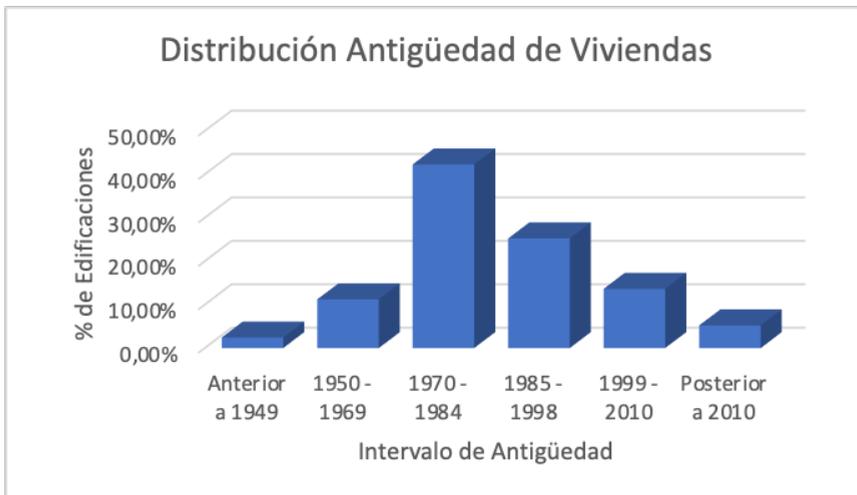
Nota. Autores.

2.7.2 Índice de Vulnerabilidad Asociado a la Antigüedad

Teniendo en cuenta lo especificado en la normativa colombiana de diseño sismo resistente, es claro que la antigüedad de la estructura

está relacionada con la vulnerabilidad de la misma, lo anterior, en función de los materiales utilizados, así como de la existencia o no de normatividad asociada a la seguridad estructural. En general, se realizó una clasificación con diferentes intervalos de antigüedad, iniciando con viviendas construidas previas al año 1949 y finalizando con construcciones posteriores al año 2010, definiendo cada intervalo con índices entre 20 (viviendas recientes) y 100 (viviendas de mayor antigüedad). La Figura 22., presenta la distribución porcentual de la antigüedad de las viviendas construidas en la ciudad de Tunja.

Figura 22. *Antigüedad de viviendas*

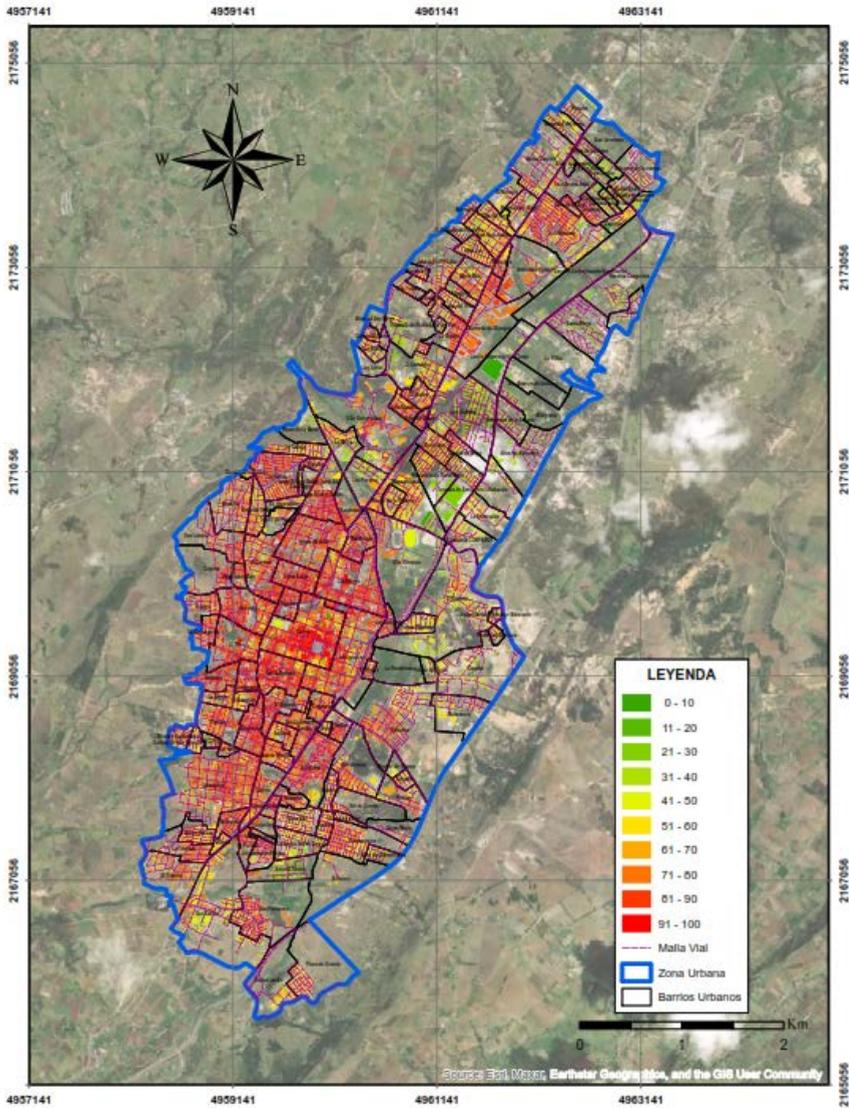


Nota. Autores.

Como se puede observar, existe un pequeño porcentaje de viviendas construidas antes de 1949, las cuales se localizan principalmente en el casco histórico de la ciudad de Tunja; así mismo, un gran porcentaje de viviendas presentan fecha de construcción entre 1950 y 1998, siendo estos dos grupos de vivienda, los que presentan mayores valores de este índice; si bien es cierto que algunas de ellas han sido restauradas, en general, conservan las características estructurales con las que fueron construidas. El comportamiento descrito anteriormente, implica que la distribución espacial de este índice en la ciudad de Tunja, presenta

valores mayores a 50 para un área considerable distribuida a lo largo y ancho de la ciudad en una gran variedad de sectores como son los barrios, El Triunfo, Trinidad, Surinama (sur), Centenario, Ricarte, Concepción, Milagro, San Lázaro (occidente), Jordán, Hunza, Patriotas (oriente), Rosales, La Granja, Los Muisca Suamox (Norte), así como la zona central de la ciudad, caracterizada por el Centro Histórico y los barrios Santa Bárbara, Popular, 20 de Julio, Santa Lucía, Maldonado y Las Nieves. Este comportamiento se puede observar en la Figura 23.

Figura 23. Distribución espacial índice de antigüedad



Nota. Autores.

2.7.3 Índice de Vulnerabilidad Asociado a Irregularidades

Consiste en establecer la posible disminución de la resistencia ante eventos sísmicos que pueden afectar a las edificaciones, debido

a la presencia de deficiencias estructurales e irregularidades de carácter geométrico en altura o planta, tales como, ausencia de vigas, columnas cortas, abertura de losas, diferentes formas de la planta, entre otras. Su valor está entre 20 y 100, siendo mayor para las estructuras sin capacidad para disipar energía.

En total, se encontró que el 54.53% de las viviendas visitadas, presentan al menos una irregularidad, de las cuales el 39.6% tiene más de una, indicando un porcentaje considerable de viviendas, lo cual implica un aumento significativo en el valor asignado a este índice.

La Tabla 15, deja ver las irregularidades reportadas en las visitas de campo, las cuales se definieron desde un identificador, con el fin de presentarlas de manera gráfica.

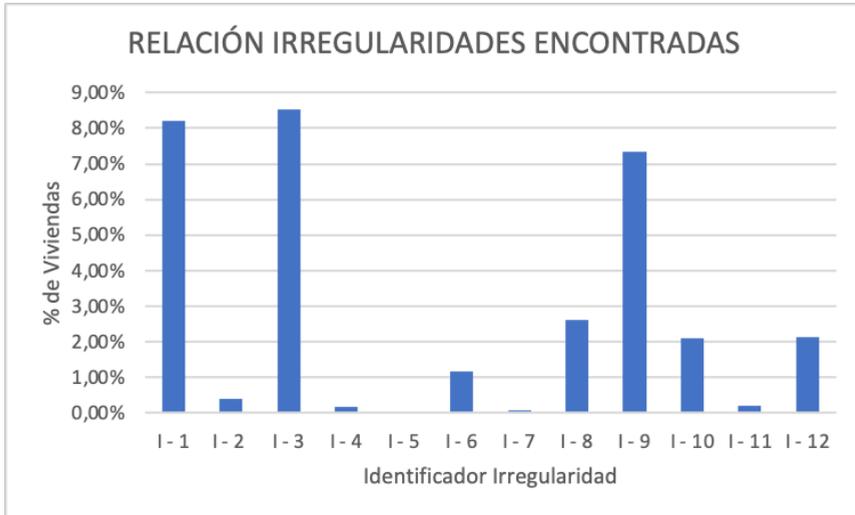
Tabla 15. Irregularidades

IRREGULARIDAD	IDENTIFICADOR	TOTAL
Ausencia de vigas en 1 o 2 direcciones	I - 1	487
Ausencia de muros en 1 dirección	I - 2	23
Estructura frágil	I - 3	507
Piso blando	I - 4	10
Columna corta	I - 5	1
Discontinuidad en el eje de la columna	I - 6	69
Grandes aberturas en losas	I - 7	5
Asimetrías de masas o asimetrías en planta	I - 8	155
Adosamiento losa contra losa	I - 9	436
Adosamiento losa contra columna	I - 10	125
Planta en forma I, H, T, U o C	I - 11	12
Masa con formaciones en T o pirámide invertidas	I - 12	127

Nota. Autores.

En la Figura 24, se muestra la distribución porcentual, siendo la ausencia de vigas, de muros y el adosamiento de losa contra losa las más encontradas.

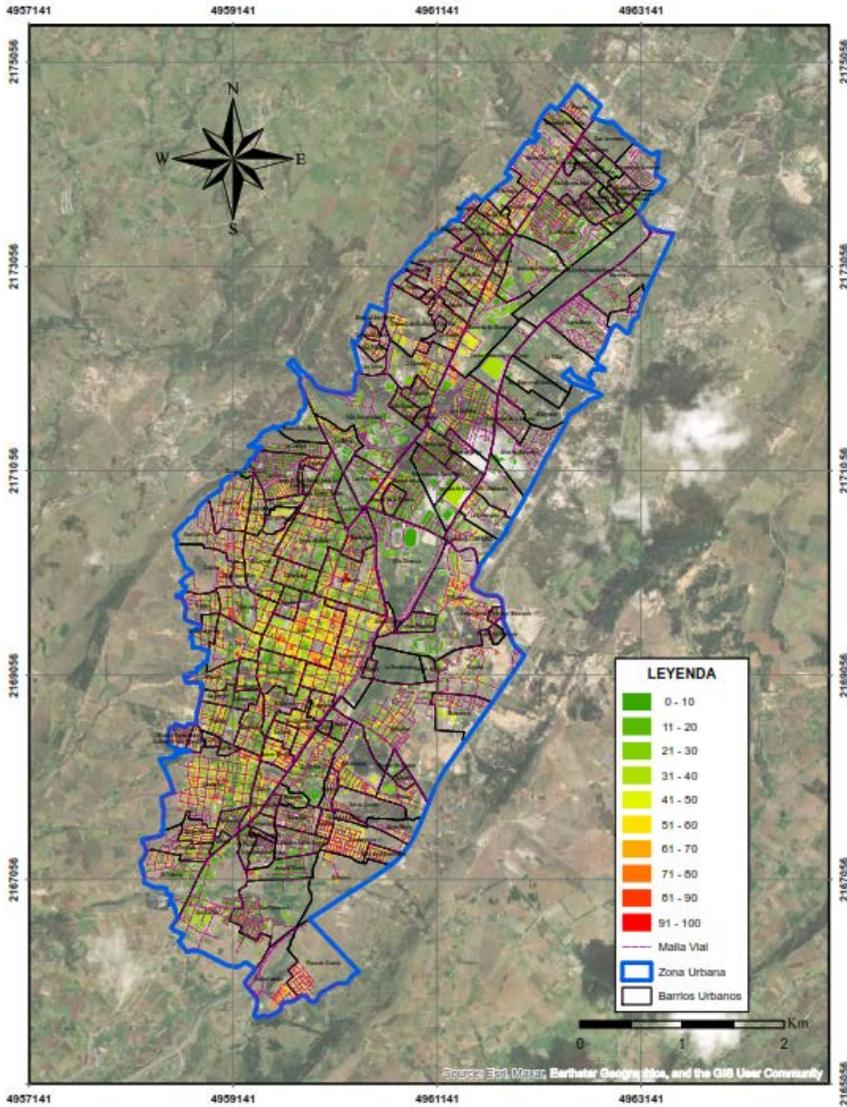
Figura 24. *Relación irregularidad encontradas*



Nota. Autores.

En general, se puede establecer que, aproximadamente la mitad de las construcciones inspeccionadas no presenta ningún tipo de irregularidad, la parte restante tiene irregularidades de diferente índole, contando con más de una irregularidad, cerca de una quinta parte de las viviendas; lo que obedece, a la existencia de construcciones que no cuentan con ningún tipo de diseño, bien sea arquitectónico o estructural; así, como a las malas prácticas constructivas y modificaciones de diseños aprobados. En la Figura 25, se presenta la distribución espacial del Índice de Vulnerabilidad asociado a irregularidades para la ciudad de Tunja, donde los sectores con concentración de mayores valores se localizan en el sur oriente, sur occidente y en la parte central de la ciudad, así como en los barrios Suárez, Aquimín, San Laureano, JJ Camacho y Estancia del Roble; las zonas restantes de la ciudad, presentan un comportamiento variado para este índice.

Figura 25. Distribución espacial índice de irregularidades



Nota. Autores.

2.7.4 Índice de Vulnerabilidad Asociado al Sistema Estructural

Consiste en definir un valor de vulnerabilidad partiendo de la definición del tipo de estructura encontrado para cada edificación,

hallando sistemas de construcción precaria y edificaciones con elementos portantes en mampostería no confinada (condiciones más críticas) hasta muros de concreto armado en dos direcciones (condiciones más favorables).

En total, para la presente investigación, se encontraron 11 tipologías estructurales, siendo la de pórtico de concreto armado, las de mayor presencia, la Tabla 16, enseña los tipos de construcción encontrados para la ciudad de Tunja.

Tabla 16. *Tipologías estructurales encontradas*

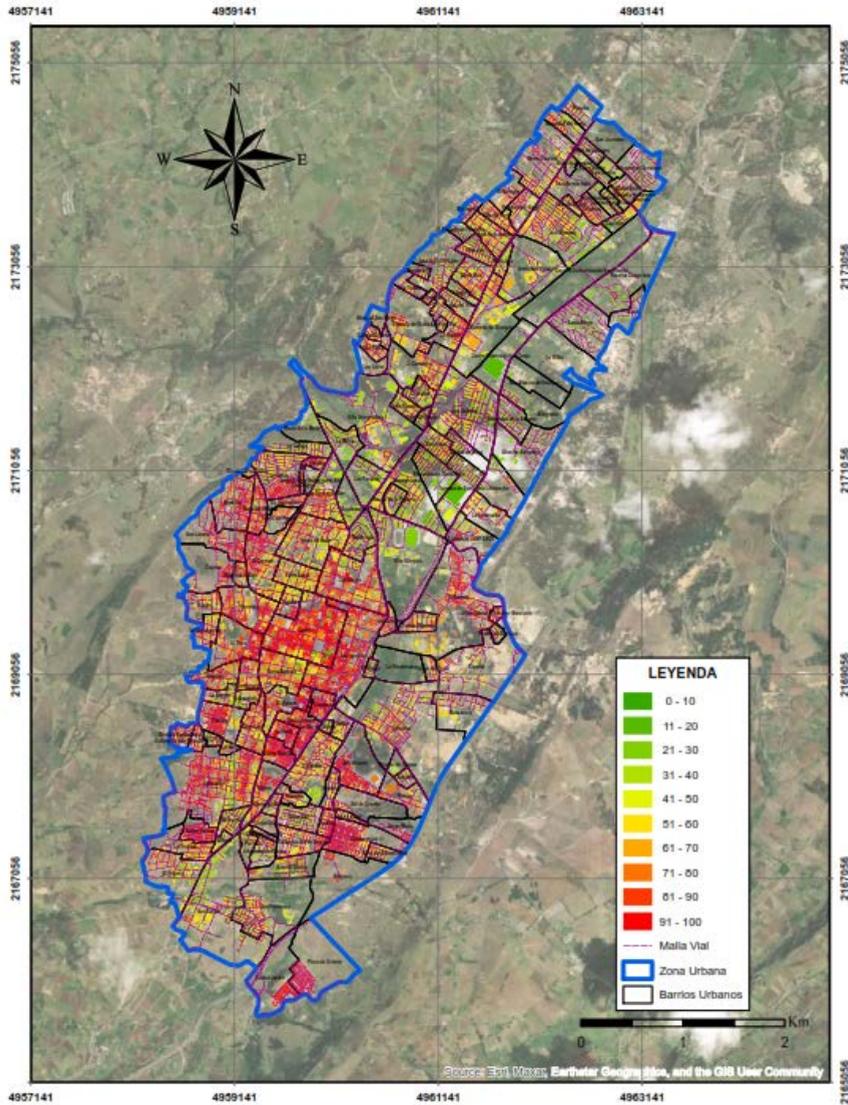
TIPOLOGÍA	%
Pórtico de concreto armado	38.88%
Muros de mampostería confinados	27.35%
Muros de mampostería no confinados	25.11%
Pórtico de concreto armado relleno con paredes de concreto	6.43%
Mixto de pórticos y de mampostería de baja calidad con altura mayor a 2 pisos	1.35%
Muros de concreto armado en 1 dirección	0.77%
Muros de concreto armado en 2 direcciones	0.12%

Nota. Autores.

Para las viviendas, se tiene una predominancia de pórticos de concreto armado, muros de mampostería confinados y muros de mampostería no confinados, siendo estos últimos, los que más vulnerabilidad tienen, en razón a su condición de rigidez, ya que, los elementos de mampostería de arcilla, cuentan una menor resistencia ante los diferentes esfuerzos estructurales frente a los elementos de concreto reforzado. La Figura 26, deja ver la distribución espacial del índice de vulnerabilidad asociado al sistema estructural para la ciudad de Tunja, y claramente, se observa que las concentraciones de índices de mayor valor, están localizadas en los sectores occidental, sur occidental, oriental y sur oriental; información asociada a sectores de la ciudad con bajos niveles socio económicos; así mismo, el centro de Tunja,

presenta altos valores de ese índice, lo cual se relaciona con la antigüedad de las viviendas.

Figura 26. Distribución espacial índice de vulnerabilidad asociado al sistema estructural



Nota. Autores.

2.7.5 Índice de Vulnerabilidad Asociado a la Topografía

Relaciona la ubicación de las viviendas y su vulnerabilidad a partir potenciales problemas estructurales causados por deslizamientos y fallas producidas por la presencia de laderas o taludes. Los mayores valores corresponden a estructuras en las que se identifique deterioro estructural causado por movimientos de tierra; del mismo modo, edificaciones construidas sobre laderas con un ángulo de inclinación promedio mayor o igual a 45° o en la cima de la ladera construida a una distancia horizontal inferior a la altura de la ladera, presentan valores altos para este índice; por el contrario, edificaciones sobre planicies y construidas en la cima de una ladera de hasta 20° de inclinación a una distancia horizontal superior a la altura de la ladera evidencian menores valores para este índice.

Del análisis de Plan de Ordenamiento Territorial - POT de la ciudad de Tunja, se pudo establecer que las pendientes encontradas, oscilan entre 0 y 54° ; no obstante, más del 50% de las edificaciones analizadas se localizan en terrenos planos, con pendientes de inclinación menores a 20° , mientras que las edificaciones localizadas sobre laderas con ángulo de inclinación mayor a 45° o en la cima de una ladera, corresponden únicamente al 3.97%, lo que implica que, el índice no influye de manera muy significativa sobre la vulnerabilidad de la zona. En la Tabla 17, se puede apreciar el tipo de topografía y su relación con la construcción de las edificaciones.

Tabla 17. *Pendiente de construcción de viviendas*

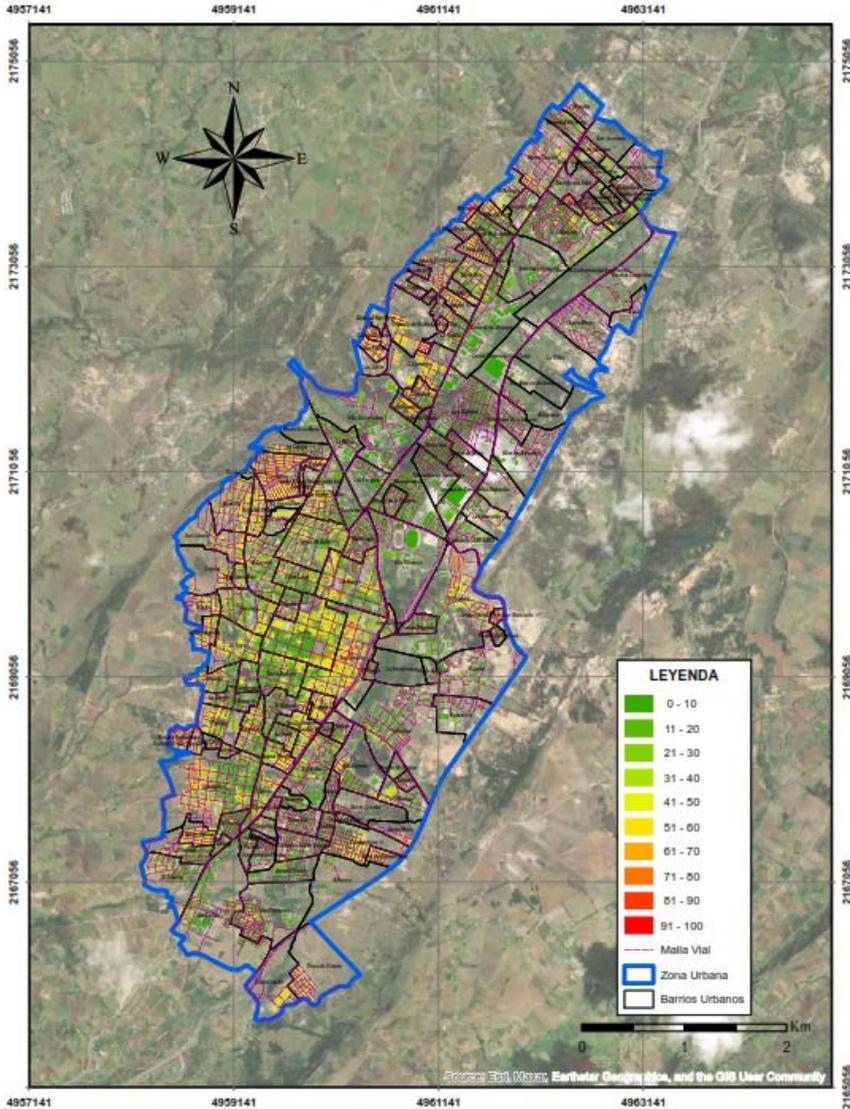
TIPO DE TOPOGRAFÍA	%
Planicie	59.78%
Laderas con ángulo de inclinación entre 20° y 45°	36.25%
Laderas con ángulo de inclinación $> 45^\circ$	2.42%
Cima o base de una ladera	1.55%

Nota. Autores.

Como se ve en la Figura 27, las viviendas localizadas sobre el costado occidental de la ciudad de Tunja, en el sector del centro hacia la avenida oriental y algunas urbanizaciones del oriente de la

ciudad, presentan los mayores valores de índice de vulnerabilidad, asociado a la topografía; las edificaciones restantes, se localizan sobre topografías favorables en el momento de la ocurrencia de un sismo.

Figura 27. Distribución espacial índice asociado a la topografía



Nota. Autores.

2.7.6 Índice de Vulnerabilidad Asociado a la Profundidad del Depósito

Corresponde al aumento de la vulnerabilidad de construcciones de altura considerable, localizadas sobre depósitos sedimentarios con una profundidad mayor a 120 m; en general, se otorga un valor de 100, para edificaciones de más de 6 pisos de altura ubicados en este tipo de suelos y 0 para el resto de edificaciones.

Se pudo establecer, que, si bien es cierto que la ciudad de Tunja cuenta con edificaciones de más de 6 pisos, las mayores profundidades de los depósitos sedimentarios oscilan entre 20 y 50 m, por lo cual, este índice, no incide en la determinación del Índice de Vulnerabilidad.

2.7.7 Vulnerabilidad Sísmica para la Ciudad de Tunja

La Figura 28, deja apreciar la distribución espacial de la vulnerabilidad sísmica para la ciudad de Tunja, trabajada con el formato FUNVISIS, en esta, se observa que salvo casos puntuales localizados en los barrios La Granja y Santa Rita y Santa Ana, la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones localizadas en el sector norte de la ciudad es baja, lo cual se relaciona con una respuesta favorable por parte de las edificaciones en el momento de la ocurrencia de un sismo.

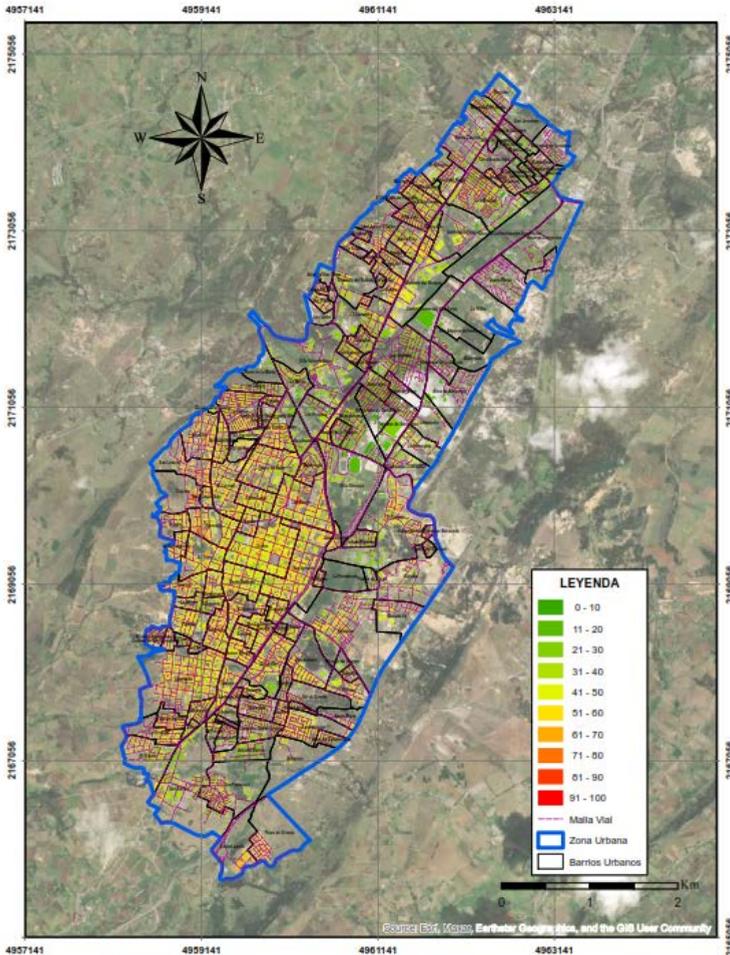
El sector correspondiente a la zona central de Tunja, desde el sur de la ciudad hasta el barrio Las Nieves (incluyendo barrios como Obrero, Suárez Rendón, Aquimín, San Laureano, Consuelo, San Ignacio, Centro Histórico y las Nieves), presentan valores moderados de vulnerabilidad sísmica, comportamiento asociado principalmente a los índices de vulnerabilidad estructural, por antigüedad y norma utilizada. Lo anterior, implica que se trata de sectores que deben tener prioridad de atención en el caso de presentarse un evento sísmico que afecte las estructuras de la ciudad de Tunja.

El sector sur de la ciudad, muestra un comportamiento diverso, ya que, en barrios como La Florida, Antonia Santos, San Carlos y San Francisco, tienen mayor parte de valores de vulnerabilidad menores a 50, mientras que se presentan zonas con altos valores,

específicamente, en el barrio Pinos de Oriente, teniendo valores que indican una vulnerabilidad moderada.

El comportamiento descrito anteriormente, es similar al encontrado en el sector oriental de la ciudad, donde se presentan intercalaciones de sectores con valores bajos, medios y moderados de vulnerabilidad sísmica, identificándose los barrios Dorado, Patriotas, Peñitas, y Santa Marta, como los de mayor vulnerabilidad ante eventos sísmicos.

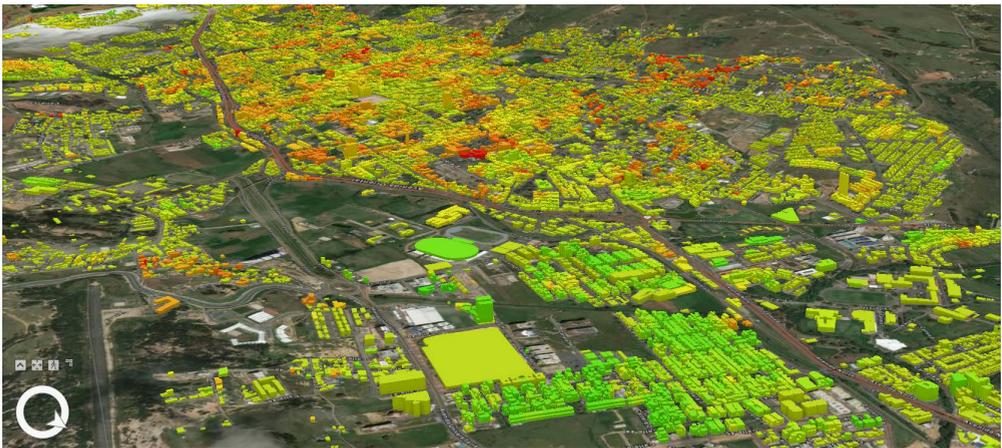
Figura 28. Vulnerabilidad sísmica de Tunja



Nota. Autores.

Finalmente, el sector occidental y sur occidental de la ciudad de Tunja, se caracteriza por presentar altos valores de vulnerabilidad sísmica, registrando valores superiores a 50, lo cual se relaciona con los valores encontrados para los índices de antigüedad y norma utilizada, sistema estructural, topografía (se evidencian altas pendientes en los terrenos construidos), irregularidades y deterioro, convirtiendo a este sector de la ciudad como el más crítico ante la ocurrencia de un sismo, ya que entre otros factores negativos, hay edificaciones con sistema estructural de mampostería no confinada; igualmente, se evidenciaron muros con alto grado de deterioro y construcciones localizadas en laderas de pendientes pronunciadas. El comportamiento general de esta zona de la ciudad puede ser observado en la Figura 29.

Figura 29. Representación 3D especialización vulnerabilidad sísmica municipio de Tunja



Nota. Autores.

2.8 Consideraciones y conclusiones

- El procedimiento para asignar el Índice de Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificaciones existentes en la ciudad de Tunja, se debe a la practicidad y precisión en el momento de referenciar la aplicación; el método propuesto puede ser aplicado a un gran número de edificaciones, lo cual lo hace

- adaptable a los programas de gestión integral de respuesta ante emergencias de ese tipo.
- La magnitud de la información y la cantidad de variables asociadas a los parámetros de recolección de datos, fue fácilmente procesada, gracias a la integración de los SIG, con la información georreferenciada; evento que a su vez, permitió modelar la información alfa numérica con una estructura de datos simple, facilitando su análisis espacial, y obtener una herramienta sencilla y versátil para la gestión de información, la cual puede ser utilizada por los entes encargados de gestión de riesgo.
 - Gracias al panel de expertos, el criterio del formato FUNVISIS, fue adaptado según las estructuras existentes en Colombia, evaluando los conceptos en función de su experiencia, discernimiento y la normativa colombiana NSR -10, determinando los valores de la reclasificación que se dan a cada criterio y que posteriormente influirán en el análisis de la información en la herramienta SIG.
 - La metodología planteada puede ser utilizada por los entes encargados de la gestión de riesgo, para la planificación e identificación de las zonas vulnerables ante eventos sísmicos, con el fin de implementar planes de mitigación y de respuesta, y a su vez, identificar los recursos disponibles para la atención de riesgos y que esta sea la adecuada.
 - Igualmente, la información encontrada y el mapa realizado, puede ser de gran utilidad para la Curaduría, dado que algunas construcciones de la ciudad, no cumplen con normas sismo-resistentes, y no poseen la licencia de construcción, información que es de fácil identificación, dadas las irregularidades en el sistema constructivo y las falencias generadas en un amplio rango de incertidumbre de las zonas con mayor vulnerabilidad.
 - Teniendo en cuenta las conclusiones de la investigación, la Curaduría, debe socializar a la comunidad lo importante que es el diseño de una construcción y con la normatividad NSR-10, con el fin de garantizar una expansión urbana responsable.