

INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE MODELOS DE AMENAZA Y  
EXPOSICIÓN EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO URBANO



JUAN FELIPE BETANCUR CALLE

Trabajo de grado

Asesora

Ana Beatriz Acevedo Jaramillo

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2024

## **Agradecimiento**

Agradezco infinitamente a mis compañeros y profesores de la Universidad EAFIT, principalmente a la profesora Ana Beatriz Acevedo Jaramillo y al ingeniero Sebastián Carrascal Díaz, quienes estuvieron presentes durante todo el desarrollo de este trabajo, y siempre tuvieron la mejor disposición al momento de guiarme y ayudarme. Gracias a su compromiso para ofrecerme orientación, resolver dudas y compartir conocimientos pude superar todos los retos que enfrenté en este proceso. Gracias a su paciencia y experiencia este trabajo pudo dar fruto a algo de lo que me sentiré orgulloso por toda mi vida, su apoyo fue un pilar clave para lograr mis objetivos y siempre estaré eternamente agradecido.

Agradezco también, de una manera muy especial, a mi familia, mis amigos, a mi pareja y a todas esas personas que estuvieron presentes en mi vida durante estos años, sin su apoyo, sus palabras de aliento y su compañía no hubiera sido posible superar los desafíos que se presentaron. Cada conversación, cada risa, cada lágrima y cada momento que compartí junto a ellos me dieron la fortaleza y la motivación para seguir adelante. Sin ellos este logro no sería posible y tampoco sería posible, por eso les dedico este importante paso en mi vida con todo el corazón.

## CONTENIDO

pág.

0. INTRODUCCIÓN .....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
2. JUSTIFICACIÓN .....	15
3. OBJETIVOS .....	17
3.1. GENERAL .....	17
3.2. ESPECÍFICOS .....	17
4. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN ENTORNOS URBANOS.....	18
4.1. RIESGO SÍSMICO .....	21
4.1.1. Análisis probabilístico del riesgo sísmico.....	21
4.1.2. Modelo de Amenaza.....	22
4.2. MÉTRICAS DE RIESGO.....	25
4.3. INCERTIDUMBRES EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....	28
5. METODOLOGÍA.....	31
5.1. DEFINICIÓN DE LUGAR DE ESTUDIO.....	31
5.2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA .....	34
5.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....	38
6. RESULTADOS .....	46
6.1. ERRORES RELATIVOS .....	46
6.2. ERRORES ASOCIADOS AL ÁREA DE LAS UNIDADES .....	49
6.3. ERRORES DISTRIBUIDOS ESPACIALMENTE.....	51
6.4. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA.....	55

6.5. CURVAS DE EXCEDENCIA.....	58
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	65
REFERENCIAS.....	68
ANEXOS .....	73

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Pesos de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del modelo de amenaza sísmica (elaboración propia) .....	22
Tabla 2. Materiales de construcción definidos en los modelos de exposición (elaboración propia) .....	23
Tabla 3. SRCL definidos en los modelos de exposición (elaboración propia) .....	24
Tabla 4. Niveles de ductilidad definidos en los modelos de exposición (elaboración propia) .....	24
Tabla 5. Características generales de los municipios seleccionados .....	32
Tabla 6. Clases de suelo definidas para el análisis de amenaza sísmica .....	35
Tabla 7. Taxonomías con mayores pérdidas para los municipios estudiados (elaboración propia).....	42
Tabla 8. Procedimientos metodológicos .....	45

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Fig. 1. Sismos con mayores pérdidas económicas y su valor asegurado entre 1980 y 2023 Adaptada de [16].....	15
Fig. 2. Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes [9]. .....	19
Fig. 3. Divisiones según el MGN para Girardota (elaboración propia). .....	20
Fig. 4. Curvas de fragilidad y vulnerabilidad usadas en el análisis (elaboración propia). .....	25
Fig. 5. Esquema de curva de excedencia de pérdidas(elaboración propia). .....	26
Fig. 6. PAE (Izquierda) y convergencia de la PAE (Derecha) para Medellín (Arriba), Bello (Centro) y Girardota (Abajo) (elaboración propia). .....	28
Fig. 7. Densidad de área construida ( $m^2/km^2$ ) vs densidad de población (personas/ $km^2$ ). El tamaño de los círculos representa el valor expuesto (millones de COP) (elaboración propia). .....	31
Fig. 8. Unidades de agregación para los tres municipios considerados (elaboración propia). .....	33
Fig. 9. Distribución de las áreas para las diferentes agregaciones de los tres municipios. Los valores indican el valor promedio del área de la unidad geográfica (elaboración propia). .....	34
Fig. 10. Distribución de la aceleración pico del suelo (PGA) en roca para diferentes periodos de retorno (elaboración propia). .....	34
Fig. 11. Mapa de vs30 para los municipios de estudio (izquierda) y distribución del porcentaje de área en planta por clases de vs30 (derecha) (elaboración propia). .....	36
Fig. 12. Mapa de vs30 considerado en los análisis para los diferentes métodos de selección de vs30 en Medellín. El gris indica las zonas dónde no se hizo análisis por ausencia de elementos expuestos (elaboración propia). .....	37
Fig. 13. Agrupación de PAE y valor expuesto por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia). .....	39
Fig. 14. Agrupación de PAE_DC y área construida expuesta por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia). .....	40
Fig. 15. Agrupación de PAE_F y personas expuestas por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia). .....	41
Fig. 16. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Medellín (elaboración propia). .....	43
Fig. 17. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Bello (elaboración propia). .....	43

Fig. 18. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Girardota (elaboración propia).	44
Fig. 19. Mapas de riesgo y exposición de la taxonomía MA/MNR/ND/H:3 para los municipios estudiados (elaboración propia).	44
Fig. 20. Errores relativos de la estimación de la PAE para los diferentes análisis (elaboración propia).	47
Fig. 21. Errores relativos de la estimación de la PAE_DC para los diferentes análisis (elaboración propia).	48
Fig. 22. Errores relativos de la estimación de la PAE_F para los diferentes análisis (elaboración propia).	49
Fig. 23. Errores relativos promedio asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia).	50
Fig. 24. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Medellín con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).	52
Fig. 25. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Bello con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).	53
Fig. 26. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Girardota con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).	54
Fig. 27. Ejemplo de FDAE (elaboración propia).	55
Fig. 28. FDAE del error relativo para la estimación de PAE (elaboración propia).	56
Fig. 29. FDAE del error relativo para la estimación de PAE_DC (elaboración propia).	57
Fig. 30. FDAE del error relativo para la estimación de PAE_F (elaboración propia).	58
Fig. 31. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE para los tres municipios estudiados (elaboración propia).	59
Fig. 32. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE_DC para los tres municipios estudiados (elaboración propia).	60
Fig. 33. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE_F para los tres municipios estudiados (elaboración propia).	61
Fig. 34. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE en los tres municipios estudiados (elaboración propia).	62
Fig. 35. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE_DC en los tres municipios estudiados (elaboración propia).	63

Fig. 36. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE\_F en los tres municipios estudiados (elaboración propia). ..... 64

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Mapa de vs30 con los diferentes métodos para Bello (elaboración propia). .....	73
Anexo B. Mapa de vs30 con los diferentes métodos para Girardota (elaboración propia). .....	74
Anexo C. Errores relativos de PAE asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia). .....	75
Anexo D. Errores relativos de PAE_DC asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia). .....	76
Anexo E. Errores relativos de PAE_F asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia). .....	77
Anexo F. Mapas de error para Medellín con vs30 diferenciado (elaboración propia). .....	78
Anexo G. Mapas de error para Medellín con vs30 en centroide (elaboración propia). .....	80
Anexo H. Mapas de error para Medellín con vs30 modal (elaboración propia). .....	82
Anexo I. Mapas de error para Bello con vs30 diferenciado (elaboración propia). .....	84
Anexo J. Mapas de error para Bello con vs30 en centroide (elaboración propia). .....	86
Anexo K. Mapas de error para Bello con vs30 modal (elaboración propia). .....	88
Anexo L. Mapas de error para Girardota con vs30 diferenciado (elaboración propia). .....	90
Anexo M. Mapas de error para Girardota con vs30 en centroide (elaboración propia). .....	92
Anexo N. Mapas de error para Girardota con vs30 modal (elaboración propia). .....	94

## ***Resumen***

La evaluación del riesgo sísmico urbano, es decir, la estimación de las consecuencias que pueden generar los sismos en un lugar está asociada a un gran número de incertidumbres, las cuales alteran los resultados y pueden resultar en subestimaciones o sobreestimaciones de las métricas del riesgo, entre ellas las pérdidas económicas y humanas. Para investigadores, gobernantes y entidades financieras es valioso obtener resultados con la mayor exactitud posible y que minimicen al máximo los errores.

Para evaluar el riesgo sísmico se requiere contar con un modelo de la amenaza del lugar (intensidades que puedan generar los sismos), la descripción de los activos de interés en el lugar (modelo de exposición) y conocer la propensión al daño de los elementos expuestos (modelo de vulnerabilidad). La distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición altera los resultados del riesgo, pues condiciona los valores de intensidades del movimiento del terreno a los que se someterán los elementos expuestos. Esta distribución espacial de los modelos se conoce como agregación y se refiere a considerar, para la evaluación del riesgo, varios activos localizados en un mismo lugar. Lo anterior condiciona a que todos los activos de una misma unidad de agregación sean sometidos a un mismo nivel de amenaza sísmica, lo que modifica la distancia real a las fuentes sísmicas. Por lo anterior, la agregación del modelo tiene un efecto en la estimación de las consecuencias (pérdidas económicas, afectaciones humanas, entre otras).

En este trabajo se hace una evaluación de la influencia de la distribución espacial de modelos de amenaza y exposición en la evaluación del riesgo sísmico urbano, aplicado al caso de tres ciudades de Antioquia: Medellín, Bello y Girardota. La evaluación se realizó haciendo un análisis de sensibilidad de resultados de riesgo sísmico considerando diferentes unidades de agregación y comparando las métricas de pérdida económica, fallecidos y número de edificaciones con daño completo obtenidas a partir de la herramienta OpenQuake. Los resultados indican que el nivel de agregación del modelo de exposición y el método de selección de las características del suelo influyen considerablemente en las estimaciones obtenidas.

Una mayor resolución en los modelos de exposición y un modelo detallado de las características del suelo logra entregar estimaciones mucho más precisas, destacando que un modelo diferenciado de las clases del suelo logra dar resultados aceptables incluso para resoluciones del modelo de exposición muy bajas.

***Palabras clave: Riesgo sísmico, modelo de exposición, modelo de amenaza, distribución espacial***

## 0. INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo sísmico urbano, es decir, la estimación de los efectos de los sismos en un lugar logra cuantificar pérdidas económicas, humanas y estructurales a partir del uso de modelos de amenaza, exposición, vulnerabilidad y fragilidad. El modelo de amenaza estima la probabilidad de ocurrencia de un sismo de cierta magnitud a cierta profundidad en la zona que se esté estudiando, teniendo en cuenta la actividad sísmica del lugar. El modelo de exposición cuantifica los elementos que se podrían ver afectados ante un sismo, como población, edificaciones e infraestructura. Por último, un modelo de vulnerabilidad permite evaluar la susceptibilidad que tienen los elementos expuestos a sufrir daños en la ocurrencia de sismos. La evaluación del riesgo sísmico tiene asociados diferentes tipos de incertidumbres a cada uno de los modelos que lo componen (amenaza, exposición, vulnerabilidad). Estas incertidumbres han sido estudiadas para lograr identificar de qué manera disminuirlas o por qué se generan al momento de la estimación del riesgo. En [1], [2], [3] evaluaron la incertidumbre epistémica de las estimaciones (debidas al conocimiento incompleto del fenómeno), donde se encontró que el cálculo de las pérdidas económicas está altamente asociado con los modelos de amenaza y de capacidad estructural, adicionalmente destacando que la variabilidad aleatoria (inherente al fenómeno) de la ubicación, la magnitud y la frecuencia de los sismos son otros parámetros relacionados con la propagación de la incertidumbre en los cálculos.

En cuanto a las incertidumbres asociadas al modelo de exposición, además de las dificultades asociadas con asignar a cada elemento expuesto una tipología estructural (que define su comportamiento sísmico), existe la incertidumbre asociada a la distribución espacial de la exposición: un modelo ideal define la exposición punto-a-punto, es decir, se considera de manera independiente cada elemento del modelo de exposición. Sin embargo, por razones que van desde el desconocimiento de las características de todos los activos hasta dificultades en la capacidad de cómputo, los modelos de exposición usualmente se presentan de manera agregada, en donde se concentran en un mismo lugar varios elementos expuestos. La distribución espacial de la exposición en el riesgo sísmico también implica modificaciones en los cálculos de amenaza, y este ha sido el foco de varios investigadores. En [4] exploraron la influencia de la agregación espacial del modelo de exposición en las estimaciones de pérdidas para un único escenario sísmico en Estambul (Turquía), encontrando que al agregar por distritos se logra obtener una pérdida anual esperada precisa, pero con un nivel de incertidumbre alto. Posteriormente, en [5], [6] evaluaron el efecto de una ubicación desconocida de los elementos del portafolio en la variabilidad de las estimaciones de frecuencia de pérdidas, concluyendo que las incertidumbres eran mayores en lugares con portafolios de menor tamaño.

En 2021 un análisis de sensibilidad de la distribución espacial del modelo de exposición regional fue realizado para 35 países de Europa por Dabbeek *et al.* [7]; en este análisis hubo variación tanto en la ubicación de la exposición como la forma de tomar las propiedades del suelo (parámetro que afecta los valores de amenaza), indicando que la distribución espacial tiene una influencia importante en la evaluación del riesgo sísmico nacional y regional, sugiriendo estudiar este tema a un nivel subregional y urbano para complementar sus hallazgos. En un trabajo reciente [8] se evaluó el efecto de la agregación

del modelo de exposición y los efectos de sitio en dos municipalidades de Suiza, usando un modelo edificio a edificio como referencia para identificar los efectos de las diferentes variaciones en el estudio. La comparación de las estimaciones de riesgo indicó errores significativos en las pérdidas anuales promedio para la agregación a pequeña escala (municipios), los cuales disminuyen al considerar conjuntos de datos más grandes.

Este trabajo está centrado en evaluar la influencia de la distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición en métricas de riesgo sísmico para edificaciones residenciales de tres municipios del Valle de Aburrá: Medellín, Bello y Girardota. Se usa un modelo de exposición a nivel de manzana de cada municipio desarrollado como parte de la iniciativa “Modelo Nacional de Riesgo Sísmico” para Colombia (MNRS), en la cual se realizó evaluación del riesgo sísmico de municipios priorizados del país. Para la estimación del riesgo el MNRS usó el modelo de amenaza sísmica desarrollado en [9] que incluye los efectos de sitio mediante la consideración de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros del suelo ( $v_{s30}$ ), obtenida para el país en [10] a partir de la pendiente topográfica con el método propuesto en [11]. Durante el MNRS se desarrollaron modelos de exposición de los municipios priorizados (entre ellos los que son objeto del presente estudio) y se desarrollaron modelos de vulnerabilidad (relación entre la amenaza y las pérdidas económicas) y fragilidad (relación entre la amenaza y los daños) para las tipologías más comunes en el país.

En este trabajo se explora la influencia de la agregación del modelo de exposición en diferentes unidades geográficas: el modelo se agrega a nivel de municipio, sector, sección y en mallas con cuadrados de 1.00 km, 0.75 km y 0.50 km de lado. Para cada unidad de agregación se considera el valor de  $v_{s30}$  de tres formas diferentes. El análisis de los resultados para las diferentes agregaciones del modelo de exposición y diferentes modelos de condiciones de sitio permite realizar un análisis de sensibilidad que busca identificar las condiciones de agregación óptimas que disminuyan los requerimientos computacionales sin sacrificar la calidad de los resultados.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis del riesgo sísmico probabilístico (PSRA por sus siglas en inglés) es usado ampliamente para estimar las pérdidas económicas, estructurales y humanas que genera un sismo o una amenaza sísmica determinada, información que permite la gestión del riesgo sísmico a través de decisiones informadas, donde se puede identificar, entre otros, puntos clave para invertir presupuesto o planes de acción.

Se reconoce que la evaluación del riesgo sísmico puede estar sujeta a diferentes incertidumbres asociadas con cada uno de los componentes de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Cada modelo está afectado por dos tipos distintos de incertidumbre: epistémica y aleatoria. La incertidumbre epistémica refleja que el conocimiento sobre el tema todavía es incompleto y que en la creación de los diferentes modelos se hacen simplificaciones, por lo tanto, esta incertidumbre podría reducirse con esfuerzos adicionales en términos de recolección de datos o mediante el desarrollo de teorías mejoradas. Por otro lado, la incertidumbre aleatoria existe por la naturaleza aleatoria de los terremotos [12]. Por lo anterior, uno de los grandes retos de los modeladores del riesgo sísmico es el manejo correcto de las incertidumbres. Como se mencionó anteriormente, el modelo de exposición (foco de estudio del presente trabajo), al igual que los demás modelos requeridos para la evaluación del riesgo sísmico, tiene incertidumbres asociadas.

El modelo de exposición se ve afectado por su resolución espacial, es decir, la distribución geográfica de los elementos expuestos, Estos modelos tradicionalmente tienen una resolución poco detallada y están agregados en los centroides de los polígonos que delimitan las unidades administrativas del sitio de estudio, esto porque a menudo la información usada para la generación de modelos de exposición viene de censos nacionales. Aunque estos modelos pueden desagregarse a partir de la distribución de la población, la resolución relativamente gruesa usualmente se mantiene por el costo computacional asociado a cálculos de riesgo muy detallados [8].

La distribución espacial del modelo de exposición genera diferencias en los resultados obtenidos cuando se considera un modelo detallado, diferencias que pueden ser considerables o no. La reubicación y agregación del modelo de exposición (con la finalidad, por ejemplo, de reducir los recursos computacionales) puede conducir a una subestimación o sobreestimación de las pérdidas calculadas. Por lo tanto, se deben estudiar las diferentes distribuciones espaciales de los modelos de exposición a partir de una agregación o desagregación de los datos, verificando que se mantenga la convergencia de los resultados y una reducción en la varianza.

A partir de la distribución espacial del modelo de exposición (y consecuentemente de la amenaza) se pueden introducir errores dentro del cálculo de diferentes formas, por ejemplo, al reubicar edificios esto puede alejarlos o acercarlos a fuentes sísmicas que puedan inducir pérdidas muy significativas o frecuentes dentro del cálculo. Estos errores pueden ser importantes cuando se usan resoluciones espaciales muy gruesas y cuando se incluyen las fuentes de falla dentro del modelo de amenaza. Adicionalmente, también se pueden producir errores grandes cuando la reubicación de los activos

(edificaciones y personas) hace que estos se ubiquen en lugares con condiciones de amplificación, lo que afecta significativamente los niveles de intensidad del movimiento fuerte del terreno que experimentarán los activos que fueron reubicados durante la agregación o desagregación [8].

Por otro lado, un modelo de exposición ideal es de alta resolución, siendo un modelo edificio a edificio el de mayor resolución posible. Anteriormente estos modelos no eran comunes y no estaban a disponibilidad, haciendo que la investigación en la agregación de modelos se enfocara en encontrar el equilibrio entre la precisión de las estimaciones y la cantidad de recursos en tiempo y esfuerzo necesarios para lograr modelos de exposición de alta resolución [4]. Actualmente el enfoque es diferente, ya que modelos de alta resolución están disponibles, como el modelo desarrollado por Yepes-Estrada *et al.* que incluye información para 215 países sobre las edificaciones residenciales, comerciales e industriales en la división administrativa más pequeña de cada uno de estos países [13]. El nuevo enfoque consiste en encontrar la agregación del modelo de exposición que logre obtener estimaciones de riesgo adecuadas y minimizar las demandas computacionales [7], [8], [14].

Se evidencia que hay una variabilidad de los resultados asociada a la distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición, la cual se debe estudiar en territorios locales, lo que permita evaluar el impacto de esta distribución en los cálculos de las pérdidas económicas y humanas en centros urbanos. En esta investigación se toma como caso de estudio municipios colombianos pertenecientes al Valle de Aburrá para evaluar el efecto de la distribución espacial y su demanda computacional asociada. Los resultados buscan generar información útil para los modeladores de riesgo sísmico en centros urbanos, que pueda usarse, inclusive, por fuera del contexto colombiano.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El riesgo sísmico se encuentra entre los riesgos por fenómenos naturales que más afectan la infraestructura en Colombia y el resto del mundo. Los sismos tienen una larga historia donde han demostrado generar grandes pérdidas económicas y humanas. Tanto las pérdidas humanas como las económicas pueden reducirse construyendo estructuras que sean sismo-resistentes y actualizando las prácticas de construcción actuales. Adicionalmente, para el caso de la recuperación luego de los desastres, las pérdidas económicas pueden gestionarse a través de la implementación de estrategias de gestión del riesgo donde se transfiera parte del riesgo financiero a otras entidades como compañías de seguros, ayudando a que la recuperación luego de un sismo sea impulsada [15]. A pesar de las alternativas de aseguramiento existentes, las pérdidas económicas causadas por sismos están en gran medida no aseguradas, como se ve en la Fig. 1, la cual presenta los cinco terremotos que han generado mayores pérdidas económicas desde 1980 a 2022 y las pérdidas que fueron aseguradas de estos.

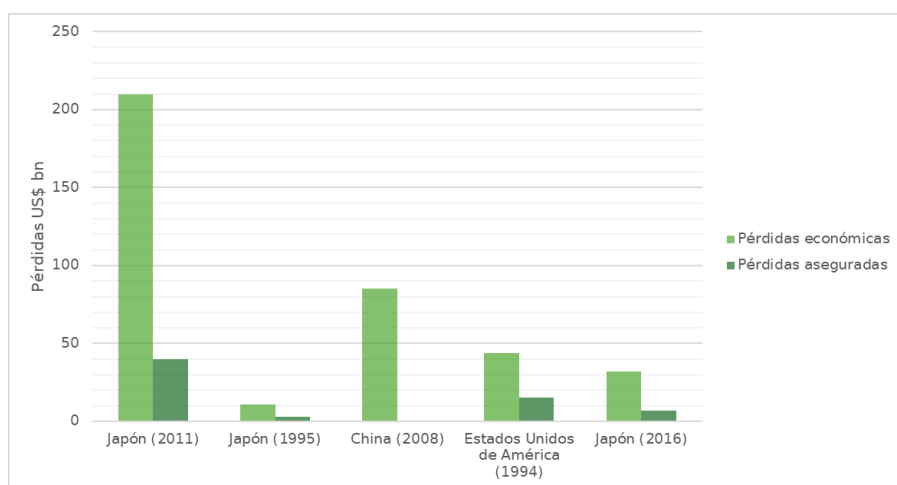


Fig. 1. Sismos con mayores pérdidas económicas y su valor asegurado entre 1980 y 2023 Adaptada de [16]

Ahora bien, las pérdidas económicas no son las únicas de gran importancia. Lamentablemente, aunque hay un poco porcentaje de sismos en el total de desastres naturales, estos son de los que más muertes generan [17]. Solamente el 8.62 % de los desastres reportados entre 1980 y 2019 son terremotos, pero el 58% de las muertes de los desastres se les asocian a estos [18].

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario una preparación y prevención que permita comprender el riesgo sísmico y sus posibles impactos, lo que ayuda a las comunidades a prepararse y tomar medidas que permitan reducir el riesgo de pérdidas económicas y humanas antes de estos eventos. La reducción del riesgo sísmico se logra a partir de una buena gestión del riesgo y respuesta ante desastres, donde pueda existir una estimación lo más precisa posible de las pérdidas humanas y económicas, ya que de esta forma las autoridades pueden movilizar los recursos y coordinar los esfuerzos de una forma más adecuada y efectiva. Los resultados de la evaluación del riesgo son útiles para diferentes partes interesadas: gobiernos, agencias de gestión del riesgo, empresas de seguros, instituciones financieras, entre otras. Estas partes pueden hacer uso de un estudio de riesgo sísmico para tomar decisiones que estén informadas y con las que se puedan proteger personas y activos [19].

Entre la historia sísmica de los últimos 50 años de Colombia se pueden destacar dos sismos considerables: el terremoto de Armenia en 1999 (6.2 Mw) y el de Popayán en 1983 (5.0 Mb). Estos sismos generaron 1185 y 287 muertos respectivamente [20]; en términos de pérdidas económicas estas corresponden al 1.9% del producto interno bruto (PIB) de 1999 y 1.5% del PIB de 1983, respectivamente. Lo anterior deja en evidencia la alta vulnerabilidad que tienen algunas construcciones en Colombia, ya que se generaron grandes pérdidas económicas y humanas a partir de sismos de una magnitud moderada. Adicionalmente, en Colombia, el 87% de la población habita en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia [21] y en los tres centros metropolitanos más grandes del país: Bogotá, Medellín y Cali, un promedio del 66% de las viviendas son frágiles y altamente vulnerables [22], presentando así un panorama de amenaza, vulnerabilidad y riesgo considerable en el país [23].

Por lo tanto, para Colombia, con una economía en desarrollo, es de gran importancia reducir el impacto económico que generan los sismos, por lo que es necesario realizar cálculos de riesgo sísmico confiables que sirvan como punto de partida para la adecuada gestión y mitigación del riesgo. Se resalta que en la evaluación del riesgo sísmico siempre existen incertidumbres y que, debido a las características de nuestro territorio, no es un riesgo que se pueda eliminar, sino que debe gestionarse de la mejor manera posible por los diferentes sectores de la sociedad: la población, los ingenieros, las autoridades regulatorias y los gobiernos.

Tanto los modelos de amenaza como los de exposición pueden considerarse en diferentes distribuciones espaciales, lo que afecta los resultados de un PSRA (“*Probabilistic seismic risk analysis*”). Teniendo en cuenta que estos análisis son los usados para la estimación de las pérdidas económicas y humanas, es necesario que se haga un cálculo adecuado teniendo en cuenta las incertidumbres en los modelos [6]. Cabe mencionar que la incertidumbre asociada con la vulnerabilidad puede afectar los resultados del riesgo sísmico en un 5-15% [15]; sin embargo, este estudio está enfocado en la incertidumbre asociada a los modelos de amenaza y exposición.

En términos de amenaza la incertidumbre se puede asociar con el nivel de detalle usado para la asignación de las condiciones del suelo del sitio y su distribución espacial [24]. Asimismo, la incertidumbre en los modelos de exposición también está asociada con su distribución espacial, ya que los datos disponibles usualmente están muy crudamente agregados espacialmente, por lo tanto, se requiere de un proceso adicional para refinar la resolución geográfica del inventario de edificaciones que tenga el modelo de exposición [4].

Los modelos de riesgo sísmico urbano tienen como fin estimar el daño generado a los elementos que hacen parte del modelo de exposición debido a los escenarios calculados en el modelo de amenaza, para luego traducir este daño físico en costos, en términos de reparación o rehabilitación y en cantidad de muertos o heridos a través del modelo de vulnerabilidad [25]. En este trabajo se explora que influencia tiene la distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición en la evaluación del riesgo sísmico urbano, evaluándolo en tres municipios del Valle de Aburrá (Medellín, Bello y Girardota), de forma que se logre dar precedentes de alternativas de modelación que permitan obtener resultados adecuados y de una forma eficiente.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1.GENERAL

Identificar la influencia de la distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición en la evaluación del riesgo sísmico urbano.

#### 3.2.ESPECÍFICOS

1. Caracterizar los modelos de amenaza sísmica y exposición de los municipios seleccionados (Medellín, Bello y Girardota).
2. Relacionar, según el tamaño de los municipios, las diferentes distribuciones espaciales favorables para la agregación de la exposición.
3. Evaluar la influencia de la agregación de la exposición y de las consideraciones de efectos de sitio en las métricas de riesgo sísmico.
4. Determinar el nivel óptimo de agregación de la exposición en términos de eficiencia y estabilidad de los resultados en las métricas de riesgo sísmico.

#### 4. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN ENTORNOS URBANOS

El riesgo sísmico es uno de los riesgos por fenómenos naturales que, aunque no es tan frecuente, puede generar las mayores afectaciones, como se ha evidenciado en Colombia en sismos pasados como el de Armenia de 1999 (6.2 Mw) y el de Popayán en 1983 (5.0 Mb). Debido al acto impacto que pueden tener los sismos, la cuantificación de los efectos que pueden generar sismos futuros es indispensable para poder gestionar y mitigar el riesgo que generan.

Colombia se encuentra localizado en una zona afectada por la convergencia de las placas tectónicas del Caribe, Nazca y Sudamericana, y por la interacción con los bloques Norandino, Coiba y Panamá, como se observa en la Fig. 2. Debido a estas interacciones en Colombia se presentan cuatro ambientes tectónicos diferentes [26]: sismos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas; sismos debidos a la subducción del Pacífico; sismos asociados con la sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y el Nido de Bucaramanga; y por último sismicidad de corteza difusa. El modelo de amenaza sísmica que se utiliza en la presente investigación para la evaluación del riesgo sísmico define como ambientes tectónicos para Colombia el ambiente cortical, la zona de subducción del Pacífico (interplaca), La zona Benioff (intraplaca profunda) y el Nido sísmico de Bucaramanga [9].

El ambiente cortical (superficial) se acota por el límite entre la corteza y el manto superior (discontinuidad de Mohorovičić), asociado con profundidades menores a los 70 km, siendo este límite variable; para Colombia dicho límite se encuentra generalmente entre los 30 km y los 60 km. La zona de subducción del Pacífico (Interplaca) está asociada a los sismos generados por la convergencia entre dos placas, específicamente cuando se genera un proceso de subducción y una de las placas se desliza bajo la otra [27]. En particular, la subducción del Pacífico colombiano corresponde al contacto entre las placas de Nazca y la Sudamérica; en esta zona han ocurrido sismos de magnitudes de más de 8.0 Mw como los de Tumaco de 8.8 Mw en 1906 y el de 8.1 Mw en 1979, causando daños significativos tanto por el movimiento fuerte del suelo como por los tsunamis generados.

La zona Benioff (Intraplaca) también hace parte del proceso de subducción, pero corresponde a los sismos producidos en la placa penetrante, es decir, la que subduce bajo la otra [28]; estos sismos se destacan porque generalmente se producen a mayores profundidades que los interplaca. Para Colombia esta zona se extiende hasta 300 km desde el Pacífico hacia el interior del continente. Por último, el nido sísmico de Bucaramanga destaca por tener una actividad sísmica intensa, que persiste en el tiempo y es aislada de la actividad de los otros ambientes mencionados. En esta zona se generan sismos con magnitudes entre 4.0 Mw y 5.0 Mw, a profundidades entre los 140 km y los 200 km [29]. Dada la complejidad del proceso se dificulta definir exactamente cuáles son las placas en subducción, estas podrían ser la Placa del Caribe con la placa Suramérica o la placa de Nazca y la placa Caribe [30].

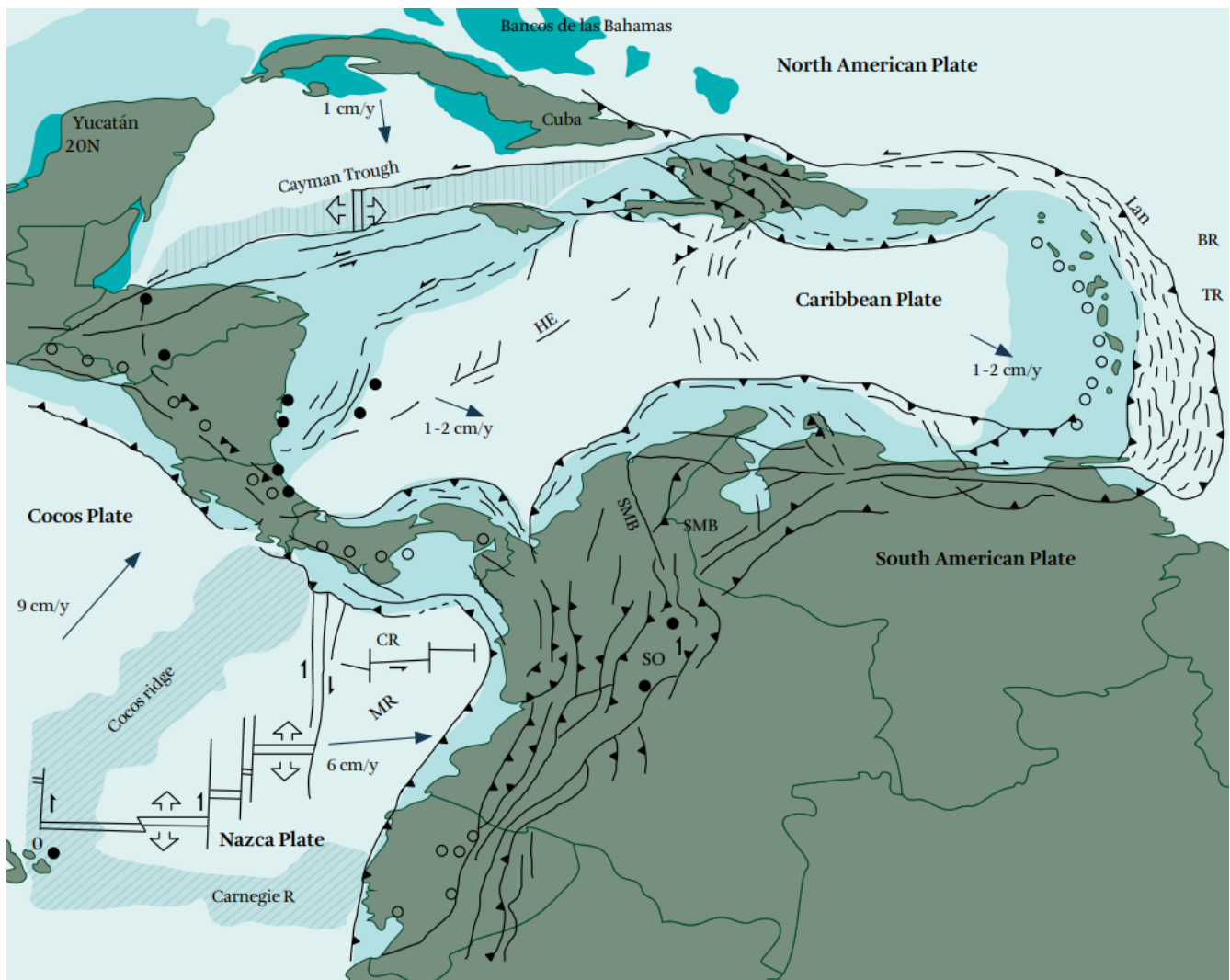
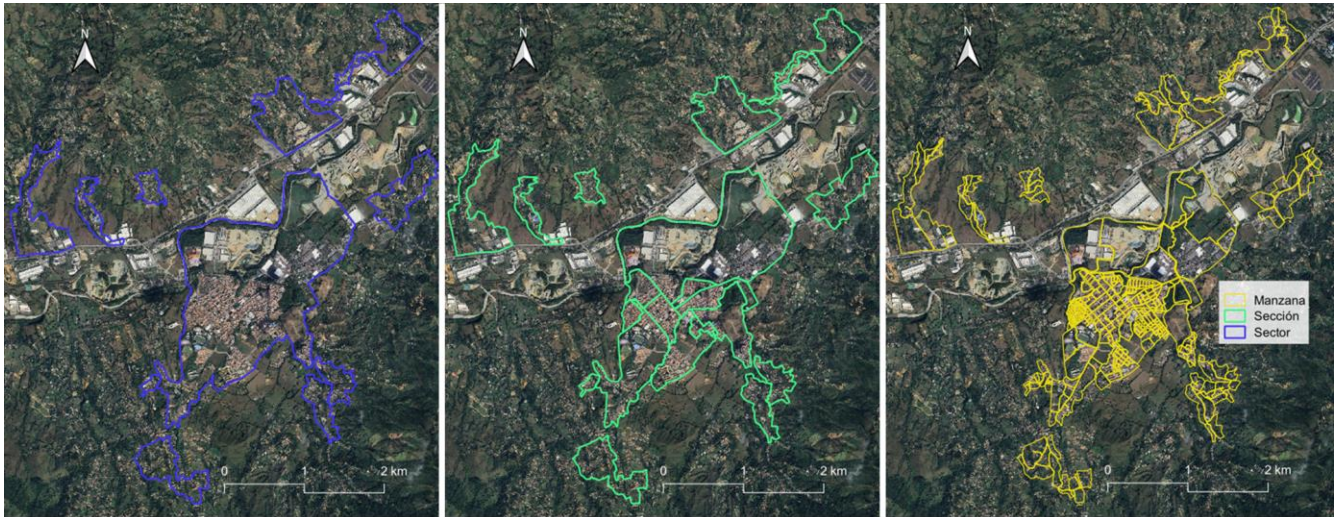


Fig. 2. Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes [9].

Según el estudio de amenaza sísmica del reglamento sismorresistente actual (NSR-10) [21], el 87% de la población habita en zonas de amenaza sísmica media y alta. La alta vulnerabilidad de parte de la infraestructura, como se ha evidenciado en sismos pasados, hace que gran parte del país esté expuesto a un riesgo sísmico importante. Se destaca que en Colombia hay tres ciudades con una población de más de dos millones de habitantes (Bogotá con 8.0 millones, Medellín con 2.5 millones y Cali con 2.4 millones). Estas ciudades, al concentrar un porcentaje importante de la población, han sido sujetas a estudios de la evaluación del riesgo sísmico [22], [30], [31]. Otras ciudades como Pereira, Tunja, Manizales, entre otros, también tienen estudios de riesgo sísmico, principalmente relacionados con estudios de microzonificación sísmica [32], [33], [34].

Recientemente el Servicio Geológico Colombiano (SGC), junto con la Asociación de Facultades de Ingeniería (ACOFI) desarrolló el Proyecto “Modelo Nacional de Riesgo Sísmico – MNRS”, en donde se realizó la evaluación del riesgo sísmico para municipios priorizados del país. Este Proyecto utilizó el modelo de amenaza sísmica de Colombia de [9], y desarrolló modelos de exposición de los municipios priorizados y modelos de vulnerabilidad/fragilidad de las tipologías estructurales más comunes en el país.

El proyecto MNRS representa un esfuerzo importante para la evaluación del riesgo sísmico en entornos urbanos, proporcionando modelos detallados de exposición desarrollados a nivel de manzana censal. Para la evaluación del riesgo sísmico en el MNRS se agregaron los modelos de exposición a niveles geográficos de sector o sección censal, según lo define el Marco Geoestadístico Nacional (MGN) [35]. La Fig. 3 presenta, a manera de ejemplo, la distribución geográfica del municipio de Girardota, uno de los municipios objeto de estudio en este trabajo.



*Fig. 3. Divisiones según el MGN para Girardota (elaboración propia).*

La evaluación del riesgo sísmico con modelos de exposición detallados como los desarrollados en el MNRS puede en ocasiones presentar dificultades computacionales. Por lo anterior, es común agregar los modelos de exposición a diferentes unidades. En el caso del MNRS se agregó el modelo desarrollado a nivel de manzana a unidades de sectores y/o secciones subdivididas según valores de  $v_{s30}$  (parámetro usado para considerar los efectos de sitio en la amenaza), considerando la amenaza sísmica en el centroide de la unidad de agregación. Con el fin de disminuir recursos de tiempo y computacionales, este trabajo explora los efectos de la agregación del modelo de exposición (y consecuentemente de la amenaza) en la evaluación del riesgo sísmico considerando los modelos de exposición desarrollados en el Proyecto MNRS.

A continuación, se describen los diferentes modelos requeridos para la evaluación del riesgo sísmico, mencionando los modelos utilizados para el análisis de sensibilidad realizado en la presente investigación. Adicionalmente se mencionan las diferentes métricas del riesgo (indicadores de las afectaciones) que se usaron para la comparación de resultados al considerar diferentes niveles de agregación.

## 4.1. RIESGO SÍSMICO

Como lo mencionan en [36], al hacer una evaluación del riesgo sísmico urbano es importante tener presente cuales pueden ser los potenciales usos de los resultados obtenidos para la toma de decisiones. Dichos resultados se suelen usar principalmente en tres categorías de decisiones: la asignación de recursos, la planificación, y la comunicación y la investigación científica. La evaluación del riesgo se puede realizar considerando un único sismo (escenario sísmico) o múltiples sismos. La consideración de múltiples sismos se realiza mediante la evaluación probabilística, la cual se utiliza en el presente trabajo y se describe brevemente a continuación.

### 4.1.1. Análisis probabilístico del riesgo sísmico

El análisis sísmico probabilístico considera la incertidumbre inherente a la ocurrencia de sismos (incertidumbre aleatoria), evaluando el riesgo a partir de modelos estadísticos que integran la frecuencia, la magnitud y la ubicación de los sismos en un sitio específico. Este análisis tiene en cuenta una gama amplia de posibles escenarios, calculando la probabilidad de que una estructura experimente diferentes niveles de intensidad de movimiento fuerte en un periodo de tiempo determinado, incorporando así las incertidumbres inherentes al proceso de generación de sismos en los cálculos de la intensidad del movimiento fuerte del suelo; y aunque tener en cuenta dicha incertidumbre agrega un nivel de complejidad al cálculo, los resultados obtenidos tienen un mayor nivel de confianza para la toma de decisiones ingenieriles, especialmente cuando se está buscando mitigar el riesgo sísmico. De esta forma, un análisis probabilístico se considera no solo como una descripción numérica del estado de la naturaleza, sino también como una herramienta para la evaluación lógica y estructurada de los resultados del análisis [36].

El análisis de riesgo también considera la incertidumbre epistémica, la cual se refiere al desconocimiento de la naturaleza misma de los fenómenos sísmicos. Esta incertidumbre surge principalmente debido a las limitaciones en los datos observados, ya que muchas veces los catálogos históricos de sismos no están completos o tienen información errónea, adicionalmente por naturaleza, la sismicidad es algo impredecible de la cual todavía hay mucho desconocimiento, lo que hace que la incertidumbre epistémica esté con una presencia importante en todo cálculo de riesgo sísmico. Se destaca que la incertidumbre epistémica también está presente en el desarrollo de los modelos de exposición y vulnerabilidad.

Dado que la evaluación del riesgo sísmico urbano requiere considerar no solo la amenaza sísmica, sino también la exposición y la vulnerabilidad de las estructuras, se deben emplear modelos de amenaza, exposición, y vulnerabilidad/fragilidad durante los cálculos. Estos modelos permiten calcular cómo los elementos expuestos responderán ante diferentes niveles de movimiento fuerte del suelo, facilitando la cuantificación y gestión del riesgo. A continuación, se describen brevemente estos modelos, mostrando cómo contribuyen al análisis del riesgo sísmico.

#### 4.1.2. Modelo de Amenaza.

Este modelo describe la probabilidad de ocurrencia de algún sismo con características específicas (magnitud, profundidad) en un lugar de estudio. Un modelo de amenaza sísmica tiene tres componentes principales: la caracterización de las fuentes sísmicas, el uso de ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del suelo y la caracterización de los efectos de sitio. Para este trabajo se usó el modelo de amenaza sísmica desarrollado por Arcila *et al.* en [9] el cual incluye cuatro ambientes tectónicos: i. Cortical, ii. Subducción interplaca, iii. Subducción intraplaca (Benioff) y iv. el Nido de Bucaramanga (fuentes profundas); y dos modelos de fuente (diferentes consideraciones de las zonas sismogénicas).

Cada uno de los ambientes tectónicos tiene en cuenta tres ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del suelo, lo que resultaría en un árbol lógico de 162 ramas o modelos creíbles de la amenaza. El árbol lógico es una herramienta que permite manejar de manera racional la incertidumbre epistémica mediante la modelación de diferentes posibles escenarios de sismicidad que se pueden presentar en el lugar de estudio, combinando múltiples modelos de fuente, ambientes técnicos y ecuaciones de predicción de movimiento, asignando un peso a cada rama de forma que se obtenga un resultado más robusto que considera diferentes posibilidades.

En los análisis de la presente investigación se utiliza el modelo de amenaza sísmica de [9], teniendo en cuenta la consideración definida en [37], en donde se definió no tener en cuenta para el ambiente cortical la ecuación de movimiento fuerte de Idriss (2014) [38] y asignar un peso igual a las dos ecuaciones restantes que son las de Cauzzi *et al.* (2015) [39] y Abrahamson *et al.* (2014) [40]. Teniendo en cuenta lo anterior, el árbol lógico resultante sería de 108 ramas; con un peso del 40% para el primer modelo de fuentes y un peso del 60% para el segundo. A continuación, se muestran en la Tabla 1 los pesos de las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte usadas en el presente trabajo.

Tabla 1. Pesos de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del modelo de amenaza sísmica (elaboración propia)

Ambiente tectónico	Ecuación de atenuación	Peso
<b>Cortical</b>	Cauzzi <i>et al.</i> (2014) [39]	0.500
	Abrahamson <i>et al.</i> (2014) [40]	0.500
<b>Subducción interplaca</b>	Abrahamson <i>et al.</i> (2016) [41]	0.437
	Zhao <i>et al.</i> (2006) [42]	0.348
	Montalva <i>et al.</i> (2017) [43]	0.215
<b>Subducción intraplaca (Benioff)</b>	Montalva <i>et al.</i> (2017) [43]	0.437
	Abrahamson <i>et al.</i> (2016) [41]	0.358
	Zhao <i>et al.</i> (2006) [42]	0.205
<b>Nido de Bucaramanga (sismicidad profunda)</b>	Zhao <i>et al.</i> (2006) [42]	0.443
	Abrahamson <i>et al.</i> (2016) [41]	0.285
	Montalva <i>et al.</i> (2017) [43]	0.272

En el cálculo de la amenaza sísmica, una opción para incluir los efectos de sitio es considerar la velocidad promedio de propagación de ondas de corte en los primeros 30 metros del suelo (vs30) en las funciones de predicción del movimiento fuerte del suelo. Las ecuaciones usan el vs30 para así ajustar las estimaciones de la intensidad del movimiento considerando el tipo de suelo y la respuesta que este tiene

ante diferentes niveles de vibración. Para el trabajo se tienen en cuenta los valores de  $v_{s30}$  definidos en [10].

#### 4.1.3. Modelo de Exposición

Este modelo cuantifica los elementos como personas, edificios e infraestructura que se podrían afectar por un sismo en una zona particular. El modelo de exposición generalmente detalla la distribución espacial, el valor económico, la ocupación, el uso y demás atributos necesarios para estimar el posible impacto que tendrían los sismos sobre los elementos expuestos. En este trabajo se usarán los modelos de exposición desarrollados para Medellín, Bello y Girardota en el MNRS [44], [45], [46]; estos modelos muestran las diferentes edificaciones definidas en taxonomías según el material de la edificación, el sistema de resistencia a cargas laterales (SRCL), el nivel de ductilidad y el número de pisos. En las Tablas 2 a 4 se expone la nomenclatura y los diferentes valores existentes en los modelos para los parámetros previamente mencionados.

*Tabla 2. Materiales de construcción definidos en los modelos de exposición (elaboración propia)*

<b>Material</b>	<b>Nomenclatura</b>
Acero	<b>AC</b>
Adobe	<b>AD</b>
Bahareque	<b>BQ</b>
Concreto reforzado	<b>CR</b>
Madera	<b>MD</b>
Madera-Zinc	<b>MZ</b>
Mampostería de arcilla cocida	<b>MA</b>
Mampostería de piedra	<b>MP</b>
Mampostería en bloque de concreto	<b>MC</b>
Material vegetal (madera burda, guadua. esterilla)	<b>VG</b>
Mixto (no ingenieril)	<b>MX</b>
Prefabricado: madera-concreto	<b>PMC</b>
Prefabricado: madera-concreto	<b>PMF</b>
Tapia pasada	<b>TA</b>
No identificado	<b>NI</b>

Tabla 3. SRCL definidos en los modelos de exposición (elaboración propia)

Sistemas de resistencia a cargas laterales (SRCL)	Nomenclatura
Muros no reforzados	<b>MNR</b>
Muros parcialmente confinados	<b>MPC</b>
Muros confinados	<b>MC</b>
Muros reforzados	<b>MR</b>
Muros delgados de concreto	<b>MD</b>
Pórticos resistentes a momento	<b>PRM</b>
Pórticos resistentes a momento con mampostería	<b>PRMM</b>
Pórticos arriostrados	<b>PA</b>
Cerchas	<b>CE</b>
Sistema combinado	<b>SC</b>
Péndulo invertido	<b>PI</b>
Losa-columna	<b>LC</b>
Estilo temblorero	<b>TE</b>
Mixto	<b>MX</b>
No identificado	<b>NI</b>
Otro	<b>OT</b>

Tabla 4. Niveles de ductilidad definidos en los modelos de exposición (elaboración propia)

Nivel de ductilidad	Nomenclatura	Subdivisión	Nomenclatura
No dúctil	<b>ND</b>	No dúctil	<b>ND</b>
Dúctil	<b>DU</b>	Nivel de disipación mínima	<b>DMI</b>
		Nivel de disipación moderada	<b>DMO</b>
		Nivel de disipación especial	<b>DES</b>
Sin identificar	<b>NI</b>	Sin identificar	<b>NI</b>

El modelo de exposición usado está agregado a nivel de manzana, con elementos ubicados en los centroides de cada una de las manzanas a donde pertenecen. Esta ubicación se modifica a medida que se agrega el modelo a nivel de sector o sección, modificando también la ubicación de los puntos de cálculo del modelo de amenaza.

#### 4.1.4. Modelo de Vulnerabilidad/Fragilidad

Las curvas de fragilidad relacionan la intensidad del movimiento fuerte del suelo con la probabilidad de exceder un estado de daño. Por otro lado, las curvas de vulnerabilidad relacionan la intensidad del movimiento con las pérdidas económicas esperadas. Las curvas de fragilidad y vulnerabilidad consideran la resistencia y la capacidad de deformación de las diferentes taxonomías definidas en el modelo de exposición y permiten conocer la susceptibilidad de los diferentes elementos a sufrir daños y pérdidas económicas.

Para esta evaluación de riesgo se usaron las curvas de fragilidad y vulnerabilidad definidas en la segunda fase del MNRS [47]. Se consideraron cuatro estados de daño: leve, moderado, severo y completo; y siete diferentes intensidades de movimiento fuerte: aceleración pico efectiva (PGA) y aceleraciones espectrales entre 0.1 y 2.0 s (SA(0.1s), SA(0.3s), SA(0.6s), SA(1.0s), SA(1.5s) y SA(2.0s)).

En la Fig. 4 se muestran, a modo ilustrativo, las curvas de fragilidad y vulnerabilidad para las taxonomías MA/MNR/ND/H:3 (mampostería no reforzada, no-dúctil de tres pisos) y CR/PRM/DMO/H:4 (pórticos de concreto reforzado con ductilidad moderada de cuatro pisos), las cuales están relacionadas con dos intensidades de movimiento fuerte diferentes (SA(0.3) y SA(1.0)). En la Figura se evidencia que en general la mampostería es más susceptible a daños y pérdidas ante intensidades menores, mientras que los pórticos de concreto presentan una mayor resistencia.

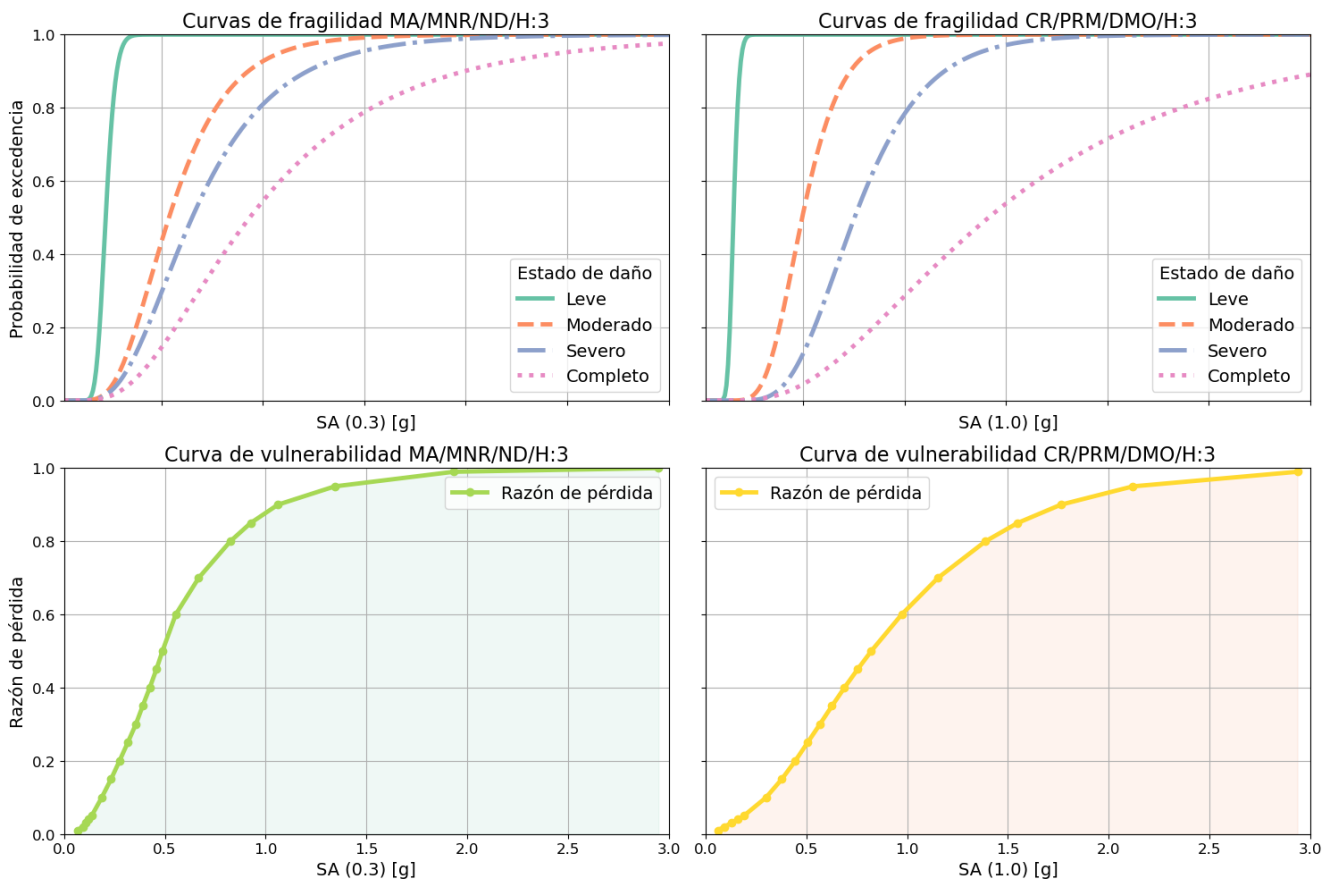


Fig. 4. Curvas de fragilidad y vulnerabilidad usadas en el análisis (elaboración propia).

## 4.2. MÉTRICAS DE RIESGO

Las métricas de riesgo son indicadores generalmente cuantitativos que permiten estimar el impacto de un evento sísmico sobre los elementos expuestos; entregando una base que permita tomar decisiones en la gestión del riesgo, ya que permiten identificar puntos críticos, priorizar inversiones y diseñar políticas de mitigación que minimicen el impacto de futuros eventos.

En este trabajo se utilizan las métricas de pérdida anual esperada y curvas de excedencia para tres parámetros: pérdida económica, número de edificios con daño completo y número de fatalidades. Como se mencionó anteriormente, el análisis probabilístico del riesgo considera una gama de posibles escenarios (como se detalla en la sección 4.2.1); para cada uno de estos escenarios se superponen los modelos de exposición y vulnerabilidad, calculando de esta manera las afectaciones asociadas a cada evento y su respectiva recurrencia. Esta información permite construir curvas de excedencia que indican la frecuencia (o periodo de retorno) de las afectaciones esperadas (pérdidas económicas, número de edificios con daño completo y fatalidades), como se presenta de manera esquemática en la Fig. 5. La pérdida asociada a cada escenario considerado puede llevarse a un valor anual (teniendo en cuenta su respectivo periodo de retorno), lo que permite obtener la métrica de pérdida anual esperada (PAE), correspondiente a la consecuencia analizada por año que causan todos los escenarios considerados.

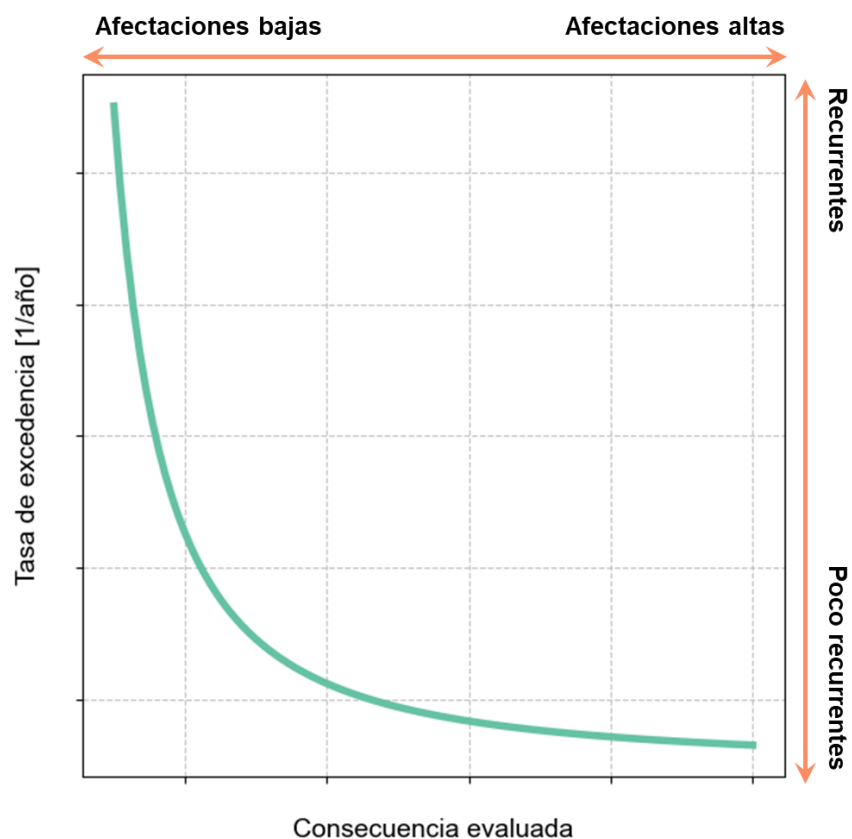


Fig. 5. Esquema de curva de excedencia de pérdidas (elaboración propia).

Las pérdidas anuales esperadas se representan mediante las siguientes siglas según la consecuencia considerada:

- Pérdida anual esperada (PAE): representa el costo estimado por año debido a los daños en los elementos expuestos.
- Número anual de edificios con daño completo (PAE\_DC): representa las edificaciones por año que tienen un estado de daño completo en el área de estudio.
- Fatalidades anuales esperadas (PAE\_F): representa la estimación de las pérdidas humanas por año en función de la ocupación de las edificaciones y la vulnerabilidad estructural de las mismas.

#### 4.2.1. Análisis de sensibilidad de las métricas de riesgo

En la evaluación probabilística del riesgo sísmico se utiliza el modelo de amenaza para generar un conjunto estocástico de eventos (SES por sus siglas en inglés). Este catálogo “sintético” es usado para evaluar los efectos de cada uno de los sismos generados en los elementos expuestos (a través del modelo de vulnerabilidad). Como se mencionó anteriormente, la incertidumbre epistémica se incluye en la estimación de la amenaza mediante árboles lógicos, por lo que cada rama con su conjunto de SES representa diferentes modelos con sus probabilidades que logran capturar múltiples resultados y construyen un análisis probabilístico más robusto [48].

Es de gran importancia determinar la convergencia del número de SES para lograr métricas de riesgo que sean confiables. Evaluar cuantos SES son necesarios para asegurar una convergencia en las métricas de riesgo logra una optimización en el uso de recursos. En el presente trabajo se realizó un análisis de convergencia considerando un conjunto inicial de eventos estocásticos (SES) de 10,000 el cual se incrementa hasta obtener una estabilidad en las estimaciones, dicha estabilidad se obtiene al analizar la convergencia del promedio y de la dispersión como se expone a continuación [49].

La convergencia del promedio se calcula a partir de la ecuación (1):

$$Conv_{promedio} = 100 \cdot \frac{|métrica_i - métrica_{i-1}|}{métrica_i} \leq 5.0\% \quad (1)$$

La convergencia de la dispersión se calcula a partir de la ecuación (2):

$$Conv_{dispersión} = 100 \cdot \frac{|dispersión_i - dispersión_{i-1}|}{dispersión_i} \leq 15.0\% \quad (2)$$

La dispersión se calcula como lo expresa la ecuación (3):

$$Dispersión_i = \frac{\ln(P_{0.85}) - \ln(P_{0.15})}{2} \quad (3)$$

siendo  $P_{0.85}$  y  $P_{0.15}$  los percentiles 85 y 15 respectivamente.

Para la evaluación de riesgo se hizo una verificación de la convergencia del promedio y la dispersión de la PAE para los tres municipios objeto de estudio, donde se obtuvo que para los tres municipios se puede usar un conjunto de 15,000 SES para las estimaciones, como se observa en la 6, en donde se presentan los valores del PAE para los diferentes SES considerados (figuras de la izquierda) y las convergencias obtenidas (figuras de la derecha). Se observa en la Figura que para todos los SES considerados los valores de convergencia y dispersión son inferiores a los valores del 5% y 15%, respectivamente, valores establecidos como aceptables por el proyecto MNRS [37].

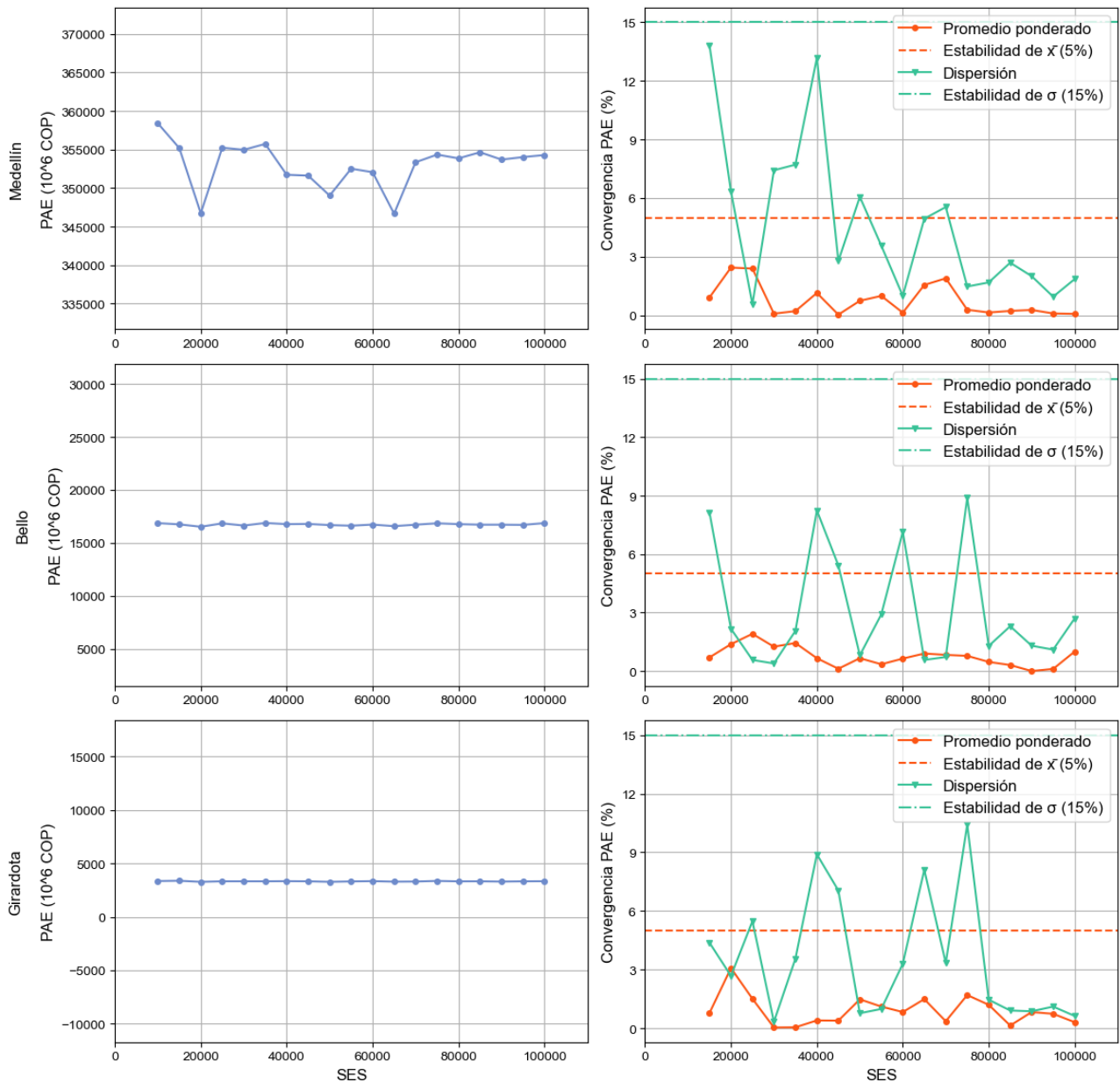


Fig. 6. PAE (Izquierda) y convergencia de la PAE (Derecha) para Medellín (Arriba), Bello (Centro) y Girardota (Abajo) (elaboración propia).

### 4.3. INCERTIDUMBRES EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Las incertidumbres en el cálculo del riesgo sísmico urbano se han estudiado desde diferentes aspectos. Crowley *et al.* en [3] realizaron una revisión sistemática de la incertidumbre epistémica para el caso de un único evento sísmico dentro de la región del Mar de Mármara, Turquía; a partir del estudio se identificó que el modelo de capacidad estructural tiene gran influencia en el cálculo de las pérdidas humanas y económicas, por lo tanto, se sugiere que sería beneficioso invertir en obtener mejores estimaciones de los modelos de vulnerabilidad. No obstante, se menciona que la incertidumbre también está relacionada con la variabilidad aleatoria asociada con ubicación, magnitud y frecuencia de los sismos y otros parámetros relacionados con los modelos de amenaza.

Posteriormente, Bommer *et al.* en [2] evaluaron las opciones que permiten controlar la variabilidad de los modelos de amenaza sísmica, donde se identificó que en el cálculo del movimiento fuerte del suelo se encuentra la mayor incertidumbre aleatoria; sin embargo, aunque la variabilidad aleatoria de la amenaza se puede incorporar en los cálculos de riesgo, para una exposición distribuida en un área de gran magnitud la variación espacial del movimiento fuerte muestra un límite de la incertidumbre en los cálculos que no se logra reducir.

Extendiendo las exploraciones previas de la incertidumbre epistémica y aleatoria, Bal *et al.* en [4] se enfocaron específicamente en la incertidumbre asociada con el modelo de exposición. Se exploró la influencia de la resolución geográfica de los datos pertenecientes al modelo, verificando de qué forma se afectan los resultados al agregar datos de un alto nivel de detalle por razones computacionales, aplicándolo a un caso de estudio en la región del Mar de Mármara, Turquía. En este estudio se obtuvo como resultado que si lo que buscan los cálculos de riesgo sísmico es encontrar la media de las pérdidas, el esfuerzo adicional requerido para refinar el detalle de la definición espacial del modelo de exposición no es justificable. Luego, Raganelli en [50] evaluó las limitaciones que tiene la evaluación del riesgo sísmico, dando sugerencias de cuáles pueden ser las mejores prácticas al momento de realizar el cálculo, enfocándose en la evaluación sísmica probabilística (PSA). Los hallazgos sugieren que, aunque se ha avanzado en el PSA sísmico, persisten desafíos en la propagación de incertidumbre y en el desarrollo de modelos más precisos.

Una expansión del estudio previamente mencionado [51], [52], analizó los aspectos más críticos durante la evaluación de las pérdidas generadas por sismos, usando el área metropolitana de Lisboa como caso de estudio. Se encontró que diferentes suposiciones en el modelado pueden resultar en estimaciones de riesgo significativamente distintas; por lo anterior, el estudio sugiere recomendaciones para obtener la mejor estimación posible. Es importante considerar la incertidumbre epistémica en los cálculos incluyendo el árbol lógico, haciendo uso de los suficientes SES para asegurar convergencia estadística en los resultados; adicionalmente, es necesario optimizar la resolución de los modelos de exposición e incluir una correlación espacial en el movimiento del suelo.

La correlación espacial se refiere a cómo las medidas de intensidad del movimiento fuerte del suelo generadas por un mismo terremoto están relacionadas a través de la distancia entre diferentes sitios. Generalmente, las intensidades tienden a estar más correlacionadas en distancias cercanas y menos correlacionadas en sitios más alejados. Para un análisis de riesgo sísmico probabilístico no tener en cuenta esta correlación puede resultar en una sobreestimación o subestimación de las métricas de riesgo, especialmente en sistemas distribuidos espacialmente como lo son las regiones urbanas [53].

Un estudio adicional sobre el impacto de la incertidumbre epistémica en la evaluación del riesgo sísmico urbano se realizó tomando como caso de estudio la ciudad de Guatemala [25]. En general, los resultados indicaron que la incertidumbre más significativa entre los tres componentes de la evaluación del riesgo es la de la amenaza sísmica, mostrando una alta sensibilidad a los modelos de fuentes sísmicas, la magnitud máxima asociada a cada fuente y la selección de las ecuaciones de predicción de movimiento

fuerte lo que confirma los resultados de [2], [51]. Adicionalmente, se destaca que esas conclusiones son válidas para Guatemala, pero que el modelo usado, al ser similar a modelos que abarcan otras regiones, puede apoyar a otros investigadores a comprender que suposiciones afectan en mayor magnitud sus modelos.

Un reciente trabajo evaluó de que forma la resolución espacial del modelo de exposición influye en la estimación de las pérdidas sísmicas usando datos de 35 países europeos [7]. A partir de la comparación de métodos de agregación y desagregación de los datos se evaluó la precisión de los resultados obtenidos de pérdida anual promedio y pérdidas asociadas a periodos de retorno específicos. De los resultados se encontró que el uso de resoluciones bajas en el modelo de exposición puede introducir sesgos significativos en las estimaciones de riesgo, especialmente al subestimar las pérdidas para eventos de retorno corto y sobreestimarlas para los de retorno más largo. Además, encontraron que la asignación de propiedades de sitio y ubicación utilizando técnicas ponderadas puede mejorar la precisión en comparación con métodos de resolución más gruesa. Sin embargo, esta investigación se realizó a escala nacional y regional, por lo que los autores recomiendan que se hagan análisis posteriores a una escala urbana para así complementar sus hallazgos.

Continuando con la incertidumbre del modelo de exposición, se destaca la evaluación de diferentes estrategias para manipular el modelo de exposición y su distribución espacial realizado por [8] buscando una eficiencia computacional y buena precisión en los resultados, usando dos ciudades de Suiza: Zúrich y Valais. Este trabajo analizó los efectos de agregar la exposición a diferentes niveles administrativos y en mallas de diferentes tamaños, partiendo de la premisa de que la agregación ideal sería usar una malla lo más densa posible. El estudio proporciona un marco referente al error relacionado a la distribución espacial del modelo de exposición, teniendo como objetivo minimizar los errores manteniendo el costo computacional manejable.

## 5. METODOLOGÍA

Este estudio evalúa cómo la distribución espacial de los modelos de amenaza y exposición influencia la estimación del riesgo sísmico urbano en tres municipios de Antioquia: Medellín, Bello y Girardota. Para tal fin se realizó un análisis de sensibilidad sobre diferentes unidades de agregación espacial del modelo de exposición (y por lo tanto de la amenaza), comparando las métricas de pérdida anual esperada y curvas de excedencia para las afectaciones económicas, número de fatalidades y número de edificaciones con daño completo. A continuación, se detallan las fases y actividades que componen este proyecto de investigación.

### 5.1. DEFINICIÓN DE LUGAR DE ESTUDIO

Para este trabajo se seleccionaron tres municipios del departamento de Antioquia: Medellín, Bello y Girardota, con una distancia máxima entre centroides de 21 km, buscando de esta manera que la amenaza en roca sea similar y no influya en los resultados de la evaluación del riesgo. Los municipios se distinguen entre sí por su población y su área, clasificándose de esta manera en las categorías *Especial* (más de 700,000 habitantes), *intermedio* (entre 160,000 y 700,000 habitantes) y *Tipo II* (entre 20,000 y 50,000 habitantes), respectivamente, según la clasificación del MNRS [37]. Esta diferencia en su población se contrasta junto con el área superficial y el área construida al presentar la densidad poblacional y la densidad de área construida en la Fig. 7.

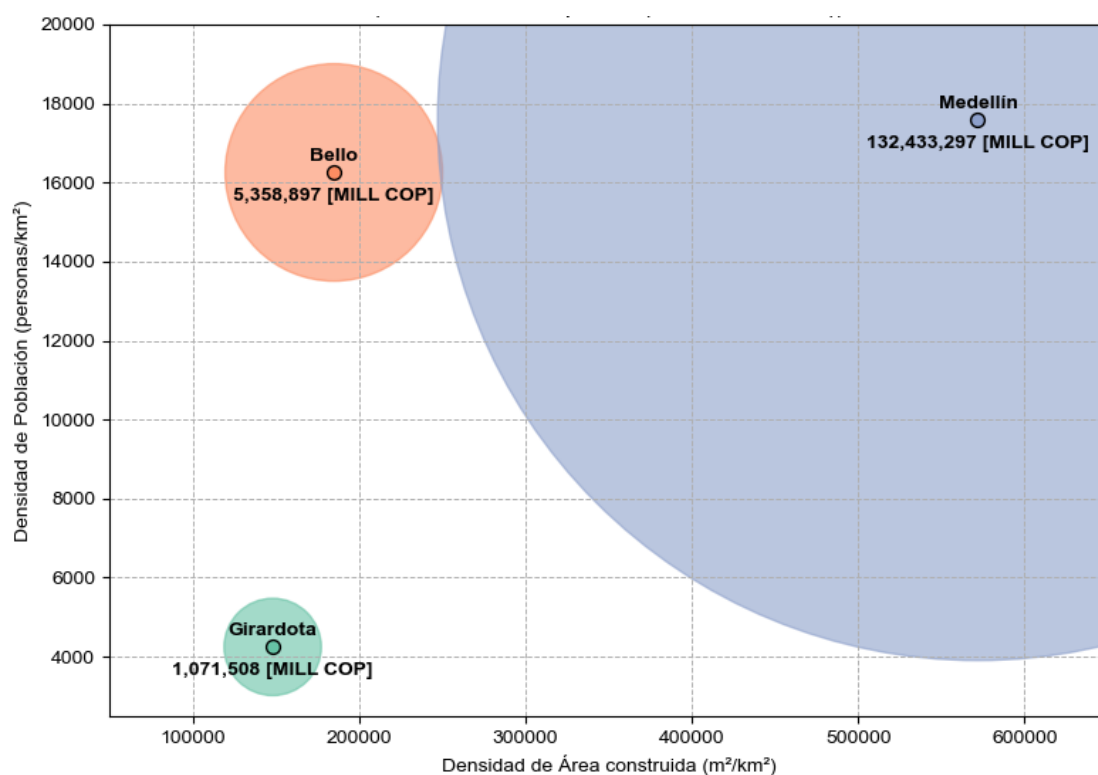


Fig. 7. Densidad de área construida ( $m^2/km^2$ ) vs densidad de población (personas/ $km^2$ ). El tamaño de los círculos representa el valor expuesto (millones de COP) (elaboración propia).

De la Figura se evidencia que Medellín y Bello tienen una densidad poblacional similar y Girardota una mucho menor. Por otro lado, Bello y Girardota tienen una densidad de área construida similar y Medellín una mucho mayor. Adicionalmente, se destaca que el valor expuesto de Medellín es mucho mayor que el de Bello y Girardota, siendo este aproximadamente 25 veces el de Bello y 130 veces el de Girardota. La Tabla 5 presenta información detallada de los municipios de estudio.

Tabla 5. Características generales de los municipios seleccionados

Municipio	Girardota	Bello	Medellín
Población <sup>[1]</sup>	26,927	383,814	1,986,258
Área urbana (km <sup>2</sup> )	6.34	23.61	113.01
Número de edificaciones residenciales <sup>[1]</sup>	3,661	41,116	227,134
Número de taxonomías de edificaciones <sup>[1,2]</sup>	35	79	116
Área construida (m <sup>2</sup> ) <sup>[1]</sup>	939,277	4,365,190	64,633,236
Valor expuesto (Millones de pesos colombianos) <sup>[1]</sup>	1,071,508	5,358,897	132,433,297
Densidad de edificaciones (edificios/km <sup>2</sup> )	5.52	3.35	1.03
Densidad de área construida (m <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	148,142.80	184,887.46	571,902.92
Densidad poblacional (habitantes/km <sup>2</sup> )	4,246.93	16,256.43	17,575.27

<sup>[1]</sup> De modelos de exposición desarrollados para centros urbanos por el MNRS.

<sup>[2]</sup> Considerando el material, el tipo de sistema resistente a cargas laterales, ductilidad y número de pisos.

Para evaluar la influencia de la distribución espacial en el modelo de exposición en este trabajo se hizo un análisis de sensibilidad con seis agregaciones diferentes del modelo de exposición, comparando los resultados del riesgo con las correspondientes a un modelo base de referencia. El objetivo de este análisis es evaluar la posibilidad de usar modelos de la menor resolución posible sin sacrificar la precisión de los resultados, e identificar cuál de las agregaciones es la mejor opción teniendo en cuenta las condiciones de sitio. Se consideraron tres agregaciones geográficas que corresponden con las divisiones del Marco Geoestadístico Nacional (MGN) de sección, sector y municipio [35], y tres agregaciones basadas en mallas cuadradas de 0.50 km, 0.75 km y 1.00 km de lado. La Fig. 8 muestra mapas de los tres municipios junto con las seis distribuciones espaciales que se tuvieron en cuenta.

El área de la malla de 0.50 km de lado es comparable al área promedio de las secciones para los tres municipios, y el área de la malla de 0.75 km de lado es similar a el área promedio de los sectores para Girardota y Medellín. Aunque las áreas de algunas mallas pueden ser comparables con las áreas de algunas de las divisiones geográficas, las áreas de las secciones y los sectores presentan mucha más variabilidad. Por lo anterior, se tomó la decisión de incluir las mallas de 0.50 km de lado en el análisis para evaluar el impacto de tener un modelo de exposición distribuido en áreas más uniformes.

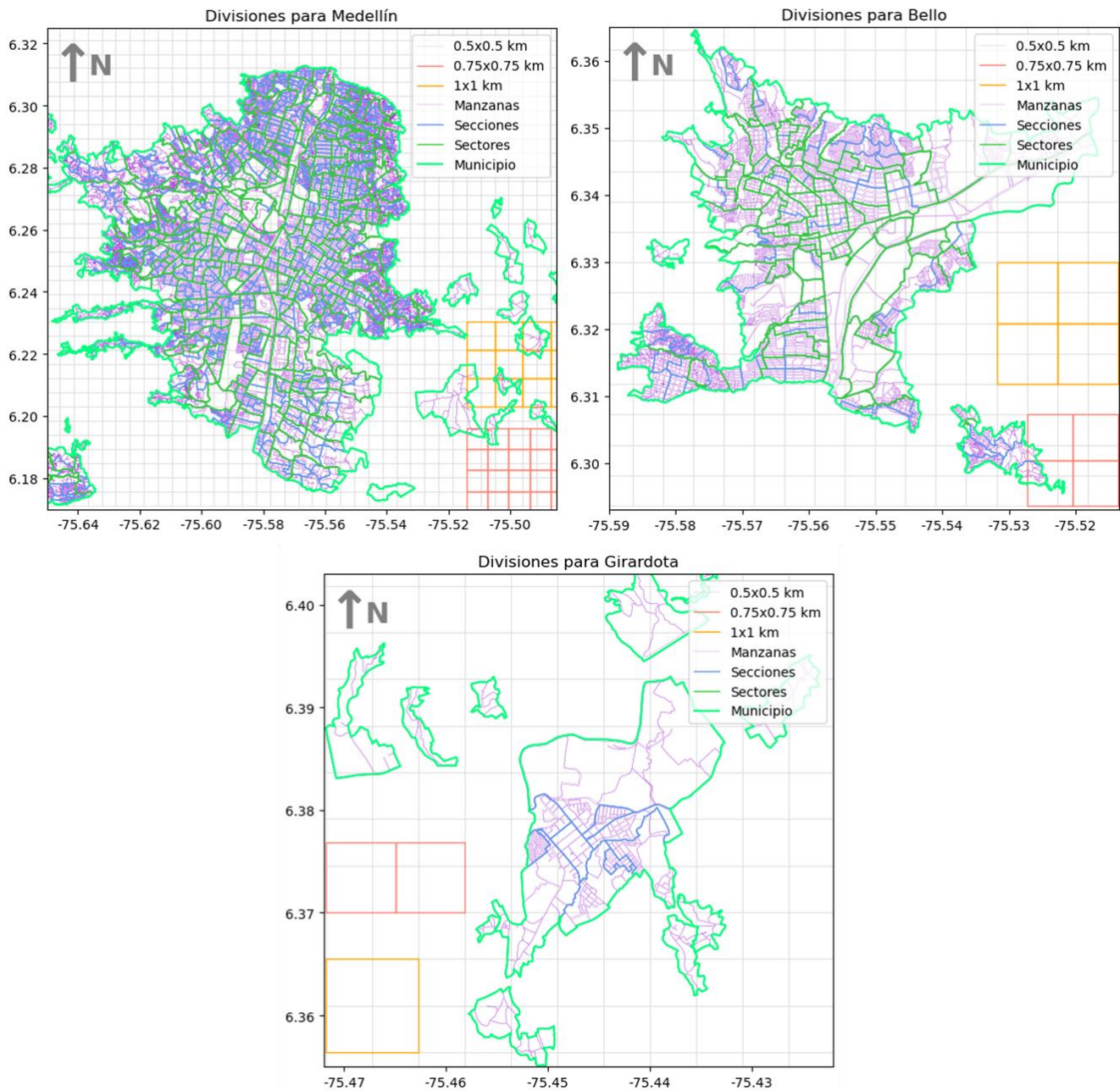


Fig. 8. Unidades de agregación para los tres municipios considerados (elaboración propia).

En la Fig. 9 se presenta la distribución de las áreas de las unidades geográficas y de las mallas consideradas en el análisis. Se destaca que el promedio del área de los sectores de Girardota se encuentra por fuera del rango de los cuartiles superiores e inferiores, definido por la caja graficada. Esto es debido a la varianza existente en las áreas de los sectores del municipio, en donde hay unos pocos sectores con dimensiones considerablemente mayores que la de los demás.

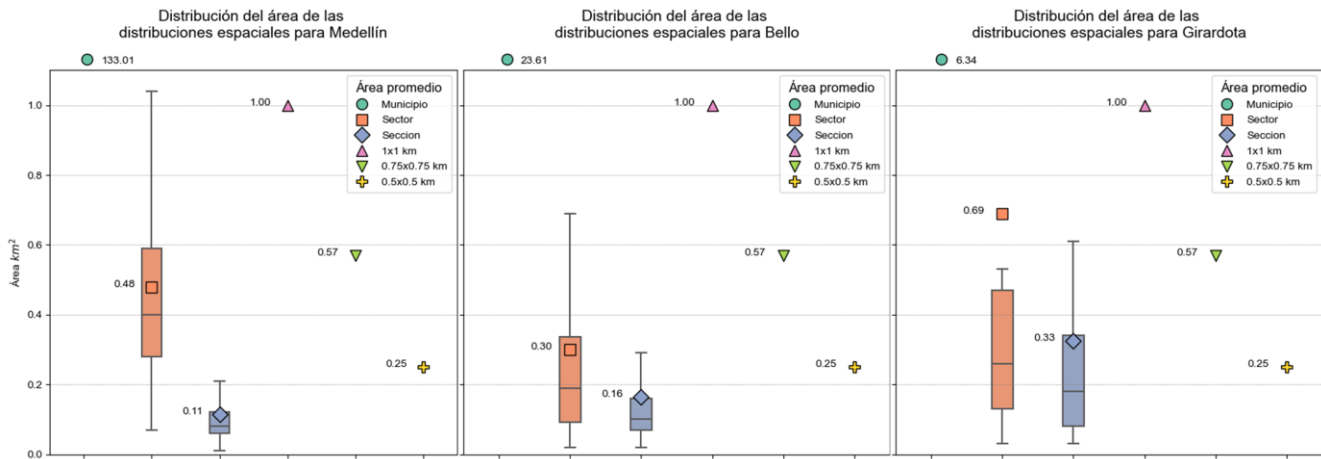


Fig. 9. Distribución de las áreas para las diferentes agregaciones de los tres municipios. Los valores indican el valor promedio del área de la unidad geográfica (elaboración propia).

El modelo de referencia con el que se comparan las variaciones de las métricas de riesgo debidas a las diferentes agregaciones considera la exposición agregada a nivel de manzana, tomando el valor de vs30 del centroide de cada una de ellas. Esta resolución es mayor a la usada en el MNRS, en el cual la exposición se agregó a nivel de sección o sector (considerando subdivisiones según valores de vs30). Dado que la agregación a nivel de manzana es el modelo con mayor resolución, se toma como referencia para evaluar las estimaciones obtenidas a partir de las demás agregaciones.

## 5.2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

Al evaluar la amenaza para los tres municipios en condiciones de roca se evidencia que la aceleración esperada en los diferentes periodos de retorno es similar para los tres sitios (ver Fig. 10). Aunque Girardota muestra valores de aceleración levemente mayores, esta diferencia es pequeña y no es significativa. Los tres municipios siguen una tendencia similar de un incremento del PGA con el aumento del periodo de retorno, pero manteniendo los valores en un rango cercano, lo que sugiere que en general la región está sujeta a un nivel de amenaza sísmica relativamente homogéneo y sin grandes contrastes entre municipios. Lo anterior permite que los resultados del análisis se enfoquen en la distribución espacial y no se vea afectado por diferencias en la amenaza sísmica en roca.

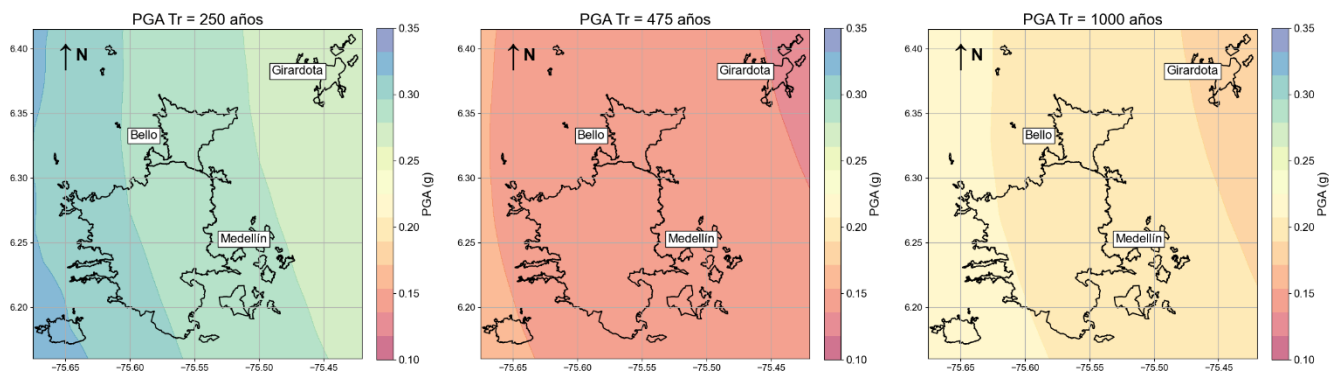


Fig. 10. Distribución de la aceleración pico del suelo (PGA) en roca para diferentes periodos de retorno (elaboración propia).

Para la evaluación del riesgo sísmico es necesario conocer la intensidad del movimiento fuerte en la superficie, ya que allí se encuentran los elementos expuestos. En esta investigación se utilizó la velocidad de onda de corte en los últimos 30 metros (vs30) para incluir los efectos de sitio. Para la consideración de vs30 se usaron valores representativos de vs30 para diferentes tipos de suelo definidos según se presenta en la Tabla 6. Debido a lo anterior, para el análisis no se considera Vs30 de forma continua, sino que se tienen en cuenta los intervalos expuestos en la Tabla 6, asignando el valor promedio que corresponde a cada uno de los intervalos. Para los municipios de estudio el vs30 está entre 1080 m/s y 185 m/s, siendo el más predominante 365 m/s.

Tabla 6. Clases de suelo definidas para el análisis de amenaza sísmica

Clase	vs30	vs30 Promedio
	m/s	
<b>A</b>	> 1500	2000
<b>B</b>	1500 - 910	1080
<b>BC</b>	910 - 640	760
<b>C</b>	640 - 440	530
<b>CD</b>	440 - 300	365
<b>D</b>	300 - 210	260
<b>DE</b>	210 - 150	185
<b>E</b>	< 150	150

En la Fig. 12 se presenta el mapa de vs30 de los tres municipios, junto con la distribución del porcentaje de área que ocupa cada una de las clases de suelo dentro del territorio. Al comparar los tres municipios se observa que Medellín presenta suelos con valores menores de vs30, es decir, más blandos (zona centro-sur); mientras que Bello y Girardota tienen suelos más rígidos, principalmente hacia el noreste. Aunque la distribución de las áreas para cada clase de vs30 es similar para los tres municipios, Girardota es el municipio con mayor área de suelos más rígidos (vs30 mayor) y con menor variación de vs30. Esto es relevante porque los suelos más blandos tienden a amplificar las ondas sísmicas, incrementando los valores de intensidad de movimiento fuerte en esas zonas.

Para este trabajo, independiente de la distribución espacial de la exposición, se toma el vs30 de cada una de las unidades de agregación de tres formas diferentes:

- Centroe: se selecciona el valor de vs30 que está en el centroide geométrico de la unidad de agregación que se vaya a estudiar.
- Modal: se toma como vs30 el valor correspondiente al tipo de suelo que cubre la mayor área dentro de la unidad de agregación considerada.
- Diferenciado: se considera para la agregación tantos puntos como clases de suelo diferentes haya en el área de estudio. Los puntos de análisis se ubican en el centroide de la unidad de agregación, pero separados un poco entre sí.

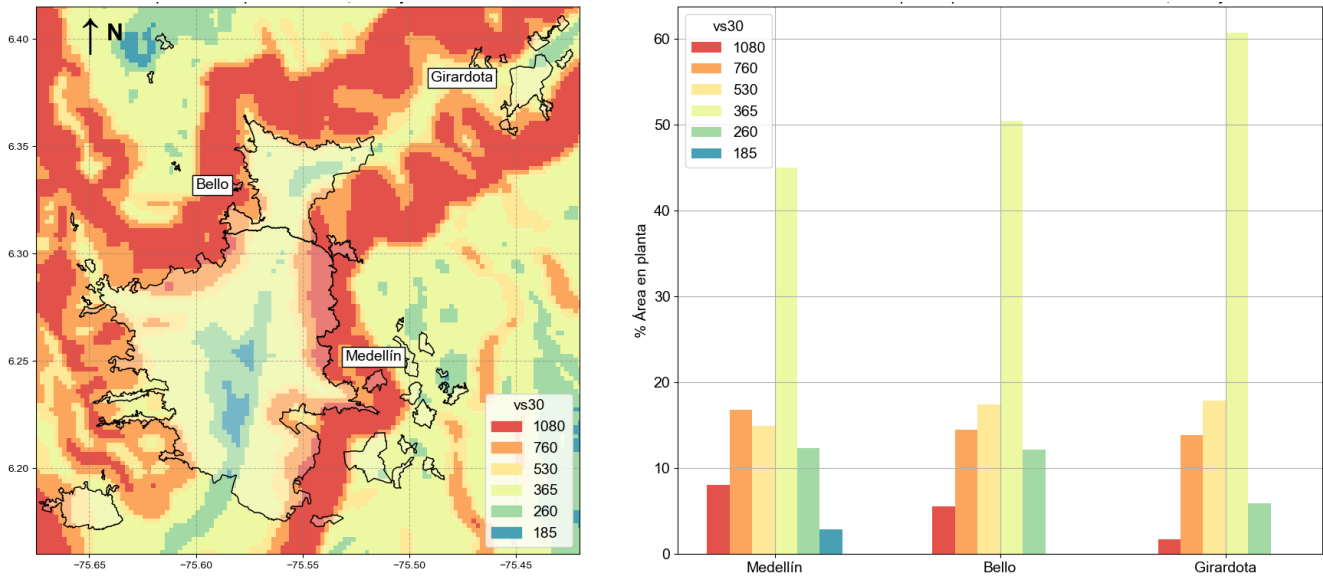


Fig. 11. Mapa de vs30 para los municipios de estudio (izquierda) y distribución del porcentaje de área en planta por clases de vs30 (derecha) (elaboración propia).

En la Fig. 12 se presenta el mapa de Medellín con el valor de vs30 considerado en el análisis según los diferentes métodos considerados: valor de vs30 al considerar el centroide (izquierda), la moda (centro), y el número de valores de vs30 cuando se considera el método diferenciado (derecha). Al considerar el centroide se asigna un valor elegido de forma netamente geométrica, que puede ignorar la variabilidad del suelo en la unidad de agregación; el método modal, al tener en cuenta la clase de suelo que cubre mayor área, proporciona un valor más representativo en casos donde la mayoría de la unidad de agregación tiene las mismas condiciones de suelo. Por último, el método de vs30 diferenciado es el más detallado, capturando toda la variabilidad del suelo dentro de cada unidad de agregación, representando los diferentes valores de vs30 simultáneamente. Adicionalmente, los mapas para el método de vs30 diferenciado permiten identificar que unidades presentan la mayor heterogeneidad de clases de suelo. Los mapas para Bello y Girardota se presentan en los Anexos A y B.

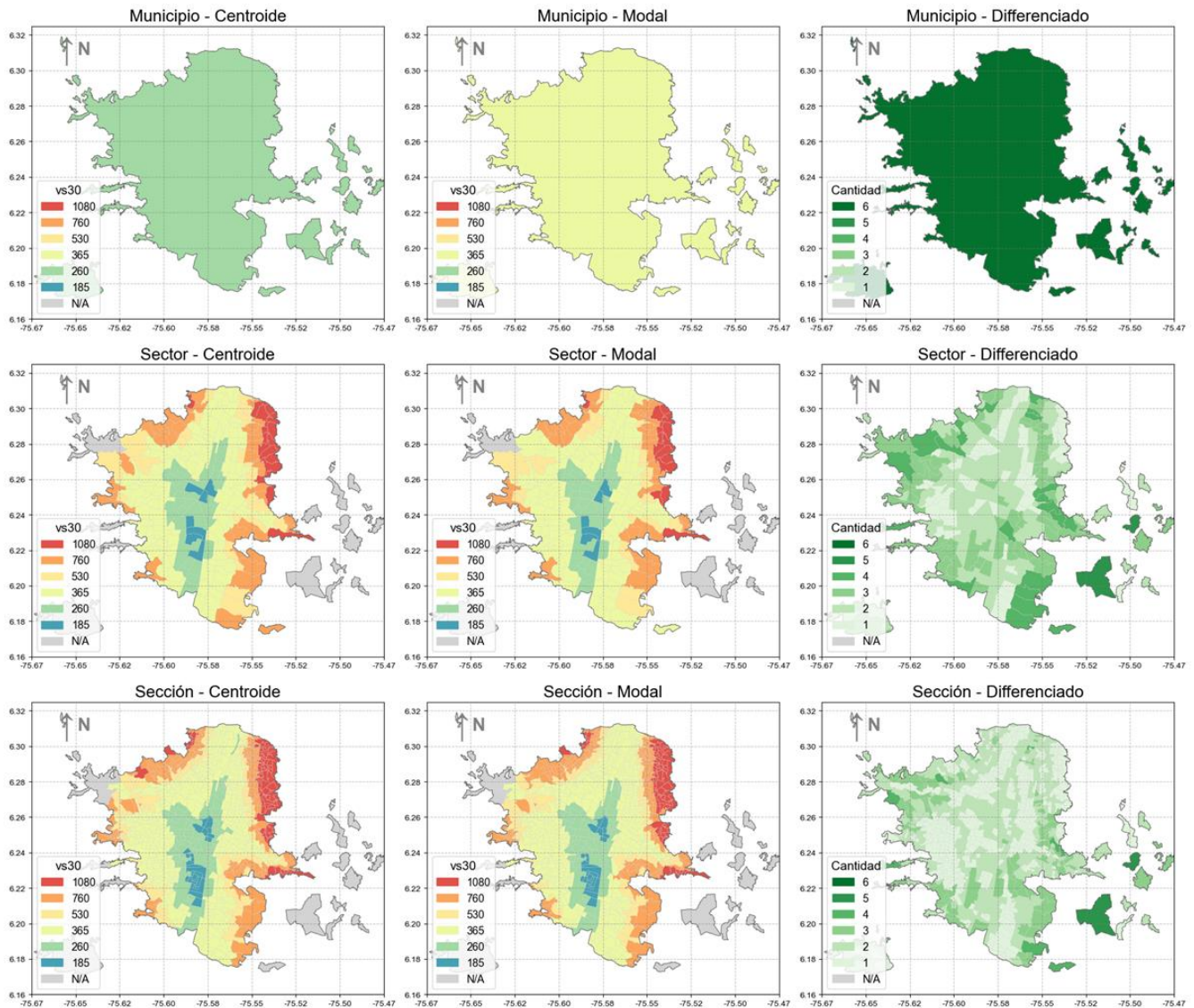


Fig. 12. Mapa de vs30 considerado en los análisis para los diferentes métodos de selección de vs30 en Medellín. El gris indica las zonas dónde no se hizo análisis por ausencia de elementos expuestos (elaboración propia).

Algo importante a considerar en el cálculo de la amenaza es la influencia de la correlación espacial y cruzada. Como se describió en apartado 4.3, la correlación espacial hace referencia a la relación estadística existente entre la intensidad del movimiento fuerte de un sismo para distintos puntos; por otro lado, la correlación cruzada evalúa la relación entre diferentes medidas de intensidad para varias ubicaciones del análisis [53].

En [52], [53] indican que el grado en el que las correlaciones pueden afectar la estimación de pérdidas es sensible a las condiciones que tenga el portafolio, específicamente en la distribución espacial y las propiedades de las diferentes estructuras expuestas. Adicionalmente, en [54] se indica que al no considerar la correlación del sitio se ven diferencias en las colas de la distribución de pérdidas estimadas, haciendo subestimaciones para pérdidas más frecuentes y sobreestimaciones para pérdidas poco frecuentes. En el análisis realizado se consideró la correlación cruzada, más no la correlación espacial debido a restricciones computacionales para el modelo de referencia de Medellín (agregado a nivel de

manzana). Aunque se generan limitaciones al excluir la correlación espacial del análisis, los resultados igualmente entregan información valiosa para lograr una optimización de la evaluación del riesgo sin sacrificar precisión en resultados. No obstante, si el enfoque del análisis es evaluar los valores extremos o las “colas” de la distribución se debe tener en cuenta que los cálculos en el presente trabajo fueron hechos sin correlación espacial.

### 5.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes consecuencias obtenidos con los modelos de exposición de referencia (agregados a nivel de manzana) agrupados según su taxonomía, lo que permite una comparación de los materiales y sistemas resistentes a cargas laterales (SRCL), para identificar cuales generan mayores afectaciones y tienen un mayor valor expuesto. Posteriormente, en el siguiente capítulo se expondrán los diferentes procedimientos metodológicos realizados para hacer el análisis de sensibilidad, donde hay variaciones en el método de selección de vs30 y la distribución espacial del modelo de exposición.

#### 5.3.1. Agrupación por taxonomías

A continuación, se presenta un resumen de la PAE y el valor expuesto (medido en millones de COP) para los tres municipios de estudio, estos resultados se agrupan por material, SRCL y por número de pisos (ver Fig. 13). Para los tres municipios las edificaciones de mampostería no reforzada presentan tanto el mayor valor expuesto como la mayor PAE, lo que indica que estas estructuras, además de estar muy presentes en los municipios, son más vulnerables y las pérdidas generadas son potencialmente altas.

Por otro lado, las edificaciones de tres a cuatro pisos son las que mayor valor expuesto representan para los tres municipios, siendo estas las que generan la mayor PAE en Medellín. Para Bello y Girardota los edificios de uno a cuatro pisos tienen pérdidas muy similares, esto se debe a que las estructuras con un menor número de pisos suelen ser las construcciones más comunes en el territorio, y son estas las que generalmente se construyen informalmente sin cumplir con la norma de sismorresistencia, haciendo que en caso de sismo también generen las mayores pérdidas, ya que son más vulnerables. Además, se evidencia que a medida que el número de pisos aumenta, el valor expuesto y las pérdidas estimadas tienden a disminuir, algo que es todavía más evidente en estructuras de cinco pisos en adelante, las cuales normalmente cumplen requisitos normativos, teniendo así mayor ductilidad y, por lo tanto, menor vulnerabilidad a las pérdidas.

De manera similar, al analizar los resultados de daño completo y fatalidades (ver Fig. 14 y 15), se observa que la mampostería no reforzada acumula tanto la mayor cantidad de edificaciones con daño completo como el mayor número de fatalidades para los tres municipios, confirmando así la evidencia de la vulnerabilidad estructural de este material y la prevalencia de edificaciones de este tipo en los territorios estudiados. En cambio, estructuras de menor vulnerabilidad y mayor ductilidad como los pórticos de concreto reforzado muestran comportamientos mucho más favorables en términos de las afectaciones.

En cuanto al número de pisos, se evidencia que las edificaciones de uno a cuatro pisos, especialmente las de tres y cuatro pisos, son las que mayores PAE\_DC y PAE\_F estimadas tienen, nuevamente confirmando no solo de que estas tienen gran prevalencia en el territorio, sino también que estas son las que mayores ocupantes y área construida tienen, señalando de nuevo que las estructuras de esta altura no tienen buena ductilidad y son muy vulnerables. Las estructuras de cinco pisos o más también presentan el mismo comportamiento de las PAE, siendo estas las que menores fatalidades y edificios con daño completo tienen asociadas.

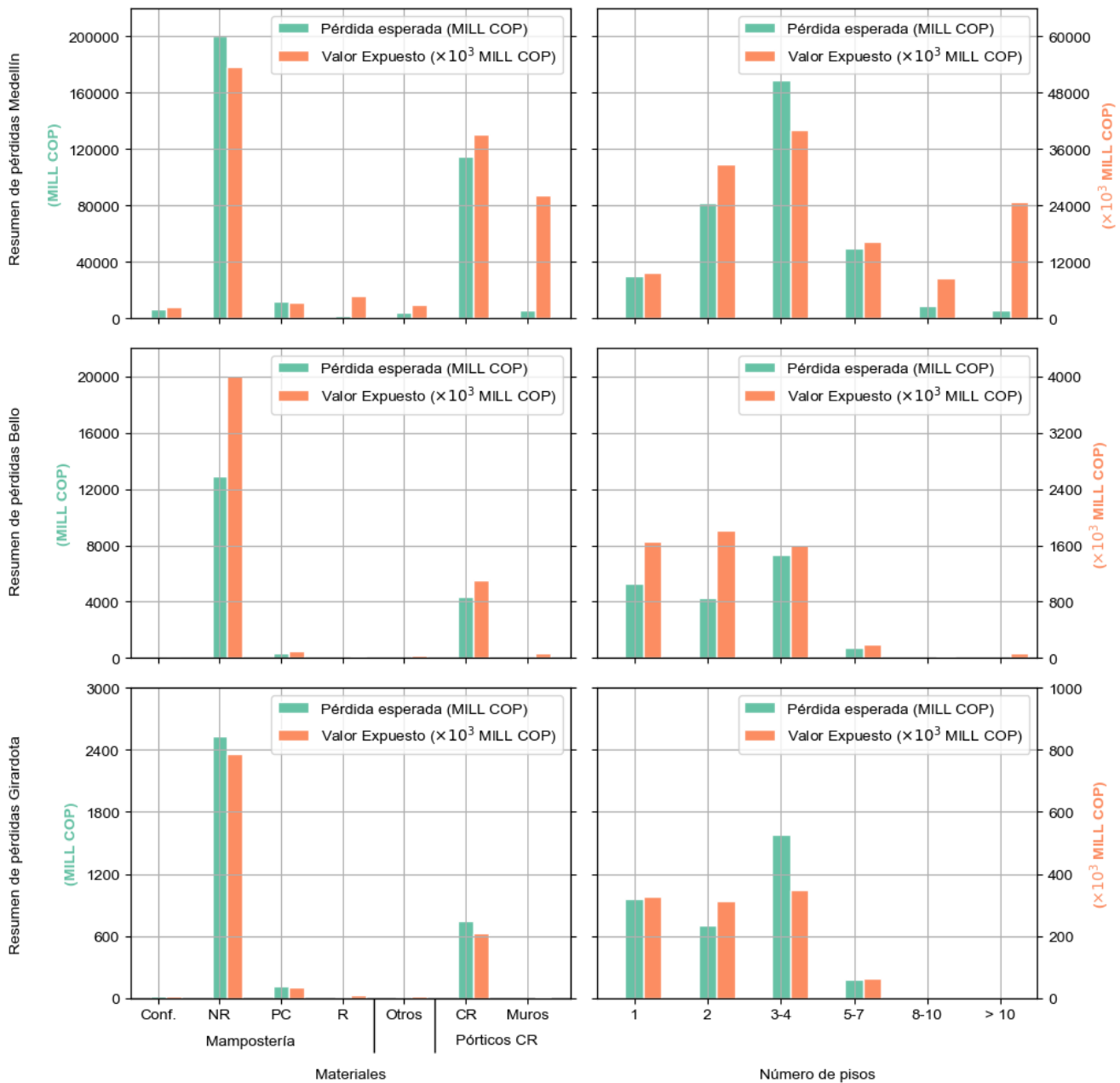


Fig. 13. Agrupación de PAE y valor expuesto por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

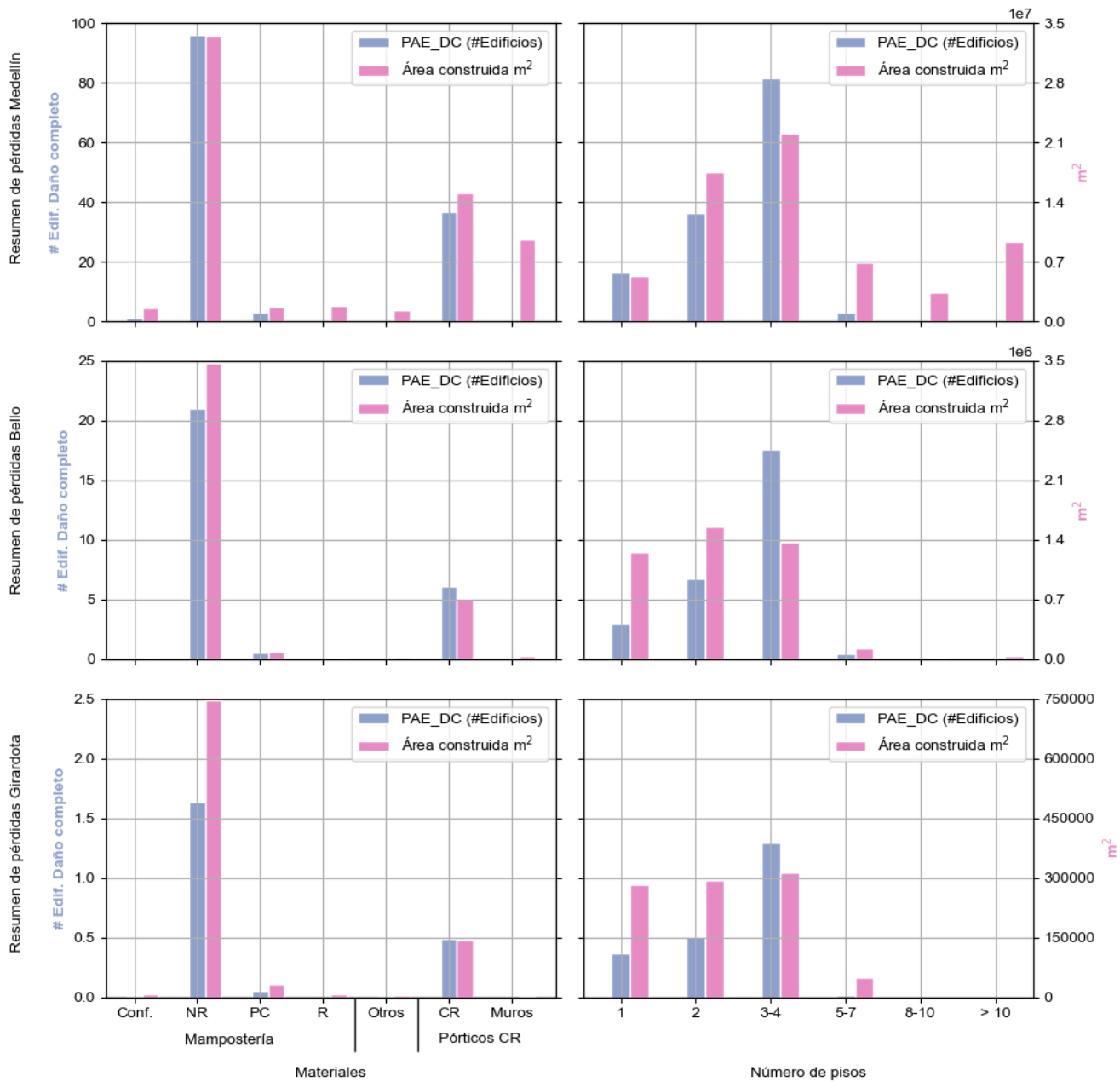


Fig. 14. Agrupación de PAE\_DC y área construida expuesta por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

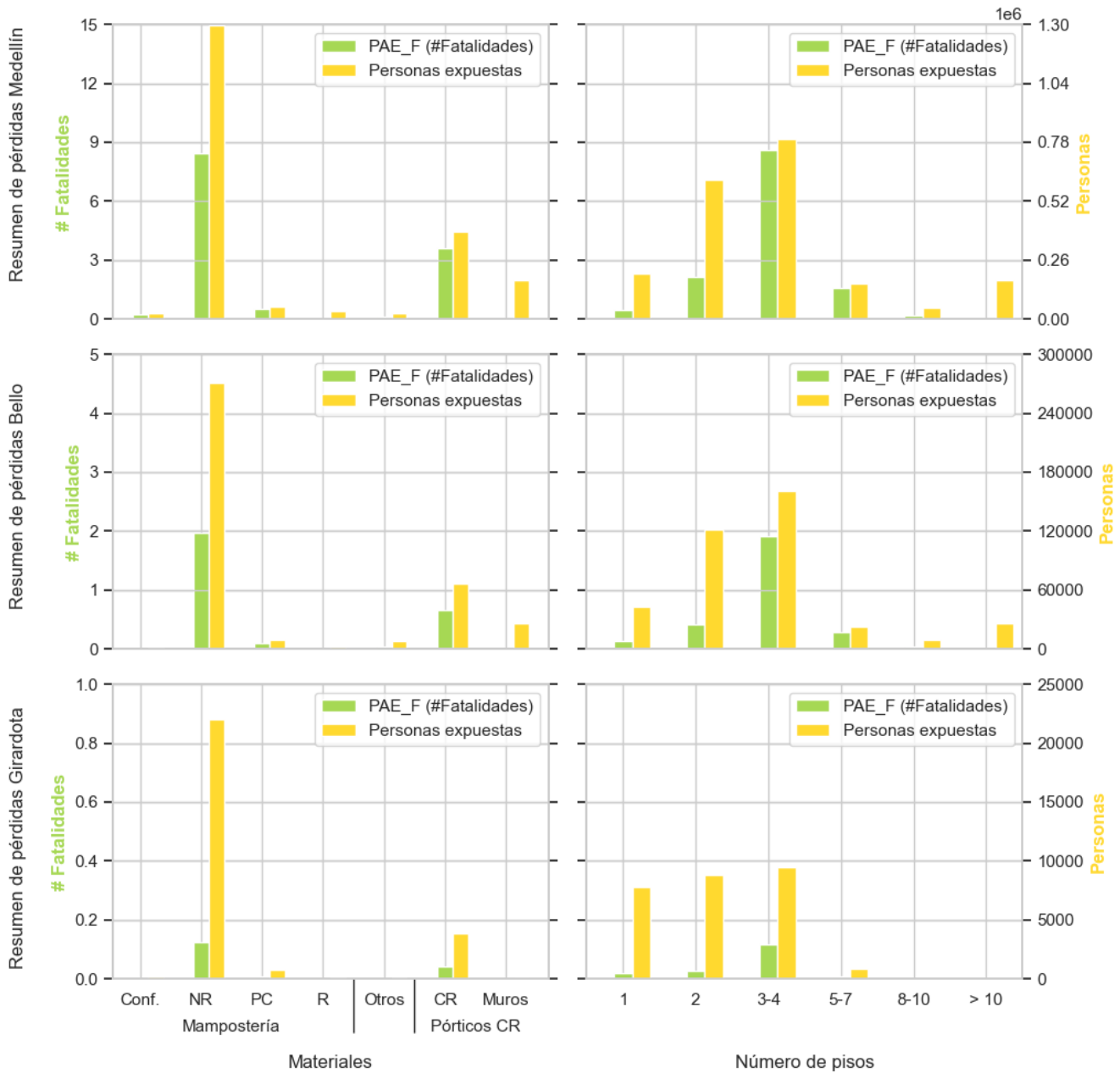


Fig. 15. Agrupación de PAE\_F y personas expuestas por material y SRCL (izquierda) y por número de pisos (derecha) para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

En la Tabla 7 se presentan para los tres municipios las cinco taxonomías que mayores pérdidas económicas generan, siendo para los tres la taxonomía MA/MNR/ND/H:3 (muros no dúctiles de mampostería no reforzada de tres pisos) la que lidera las pérdidas, generando en promedio dos veces las pérdidas generadas por la segunda taxonomía.

Tabla 7. Taxonomías con mayores pérdidas para los municipios estudiados (elaboración propia)

Municipio	Taxonomía	Valor Expuesto	PAE
		Mill. COP	
Medellín	MA/MNR/ND/H:3	21,137,049	109,009
	CR/PRM/ND/H:2	8,235,012	40,073
	MA/MNR/ND/H:2	19,512,972	37,888
	CR/PRM/ND/H:3	6,710,329	19,404
	CR/PRM/ND/H:4	6,309,973	17,323
Bello	MA/MNR/ND/H:3	1,024,267	5,561
	MA/MNR/ND/H:1	1,391,993	3,549
	MA/MNR/ND/H:2	1,442,431	2,890
	CR/PRM/ND/H:1	219,073	1,662
	CR/PRM/ND/H:2	319,179	1,348
Girardota	MA/MNR/ND/H:3	218,481	1,159
	MA/MNR/ND/H:1	270,381	635
	MA/MNR/ND/H:2	266,961	498
	CR/PRM/ND/H:1	50,344	299
	CR/PRM/ND/H:2	48,495	198

### 5.3.2. Distribución espacial del riesgo

El riesgo sísmico también puede evaluarse a partir de su distribución espacial, identificando las zonas con mayor exposición y las zonas con mayor susceptibilidad a pérdidas. Las Fig. 16 a 18 presentan mapas de riesgo y exposición para los tres municipios analizados. Medellín está mostrando una concentración de las mayores pérdidas en la zona central del municipio, lo que coincide generalmente con las zonas de mayor densidad urbana y actividad económica. Por otro lado, se destaca que, para el área periférica de la zona norte, aunque no se presentan valores expuestos considerablemente altos, se presentan pérdidas que destacan, lo que indica una concentración de edificaciones que son más vulnerables en estas zonas.

En el caso de Bello se identifica que las zonas con niveles altos de pérdidas y de valor expuesto coinciden en gran medida, esto indica que, generalmente, las zonas que son económicamente más valiosas son más vulnerables a PAE significativas. Las zonas con una densidad alta de edificaciones con daño completo están distribuidas en varias áreas del mapa, lo que refleja que el tipo de construcciones con baja resistencia está ampliamente distribuido a lo largo de todo el municipio.

Por último, Girardota presenta coincidencia en sus áreas de mayor valor expuesto y mayores pérdidas, estando concentradas principalmente en la zona central del municipio; por otro lado, las zonas con menor riesgo están en áreas periféricas del municipio, donde la actividad urbana es limitada. A diferencia de Medellín y Bello, donde las áreas de alto riesgo están distribuidas más ampliamente, en Girardota la distribución es más localizada, reflejando un patrón urbano menos expansivo.

Estos mapas de riesgo son útiles porque proveen información que permite la identificación de zonas donde se deben enfocar los esfuerzos de mitigación de riesgo y aquellas que sufrirán las mayores afectaciones en caso de un sismo fuerte. Es de destacar que los valores que están en gris en los mapas se refieren a las zonas donde no se realizó un análisis dada la ausencia de elementos expuestos.

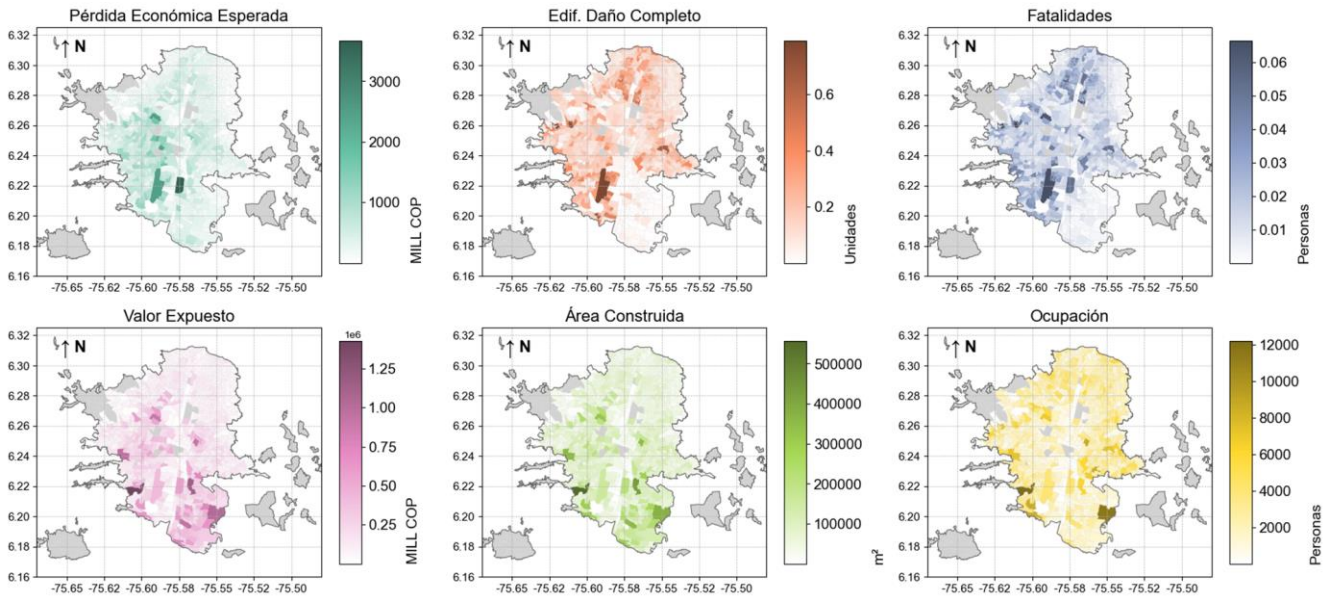


Fig. 16. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Medellín (elaboración propia).

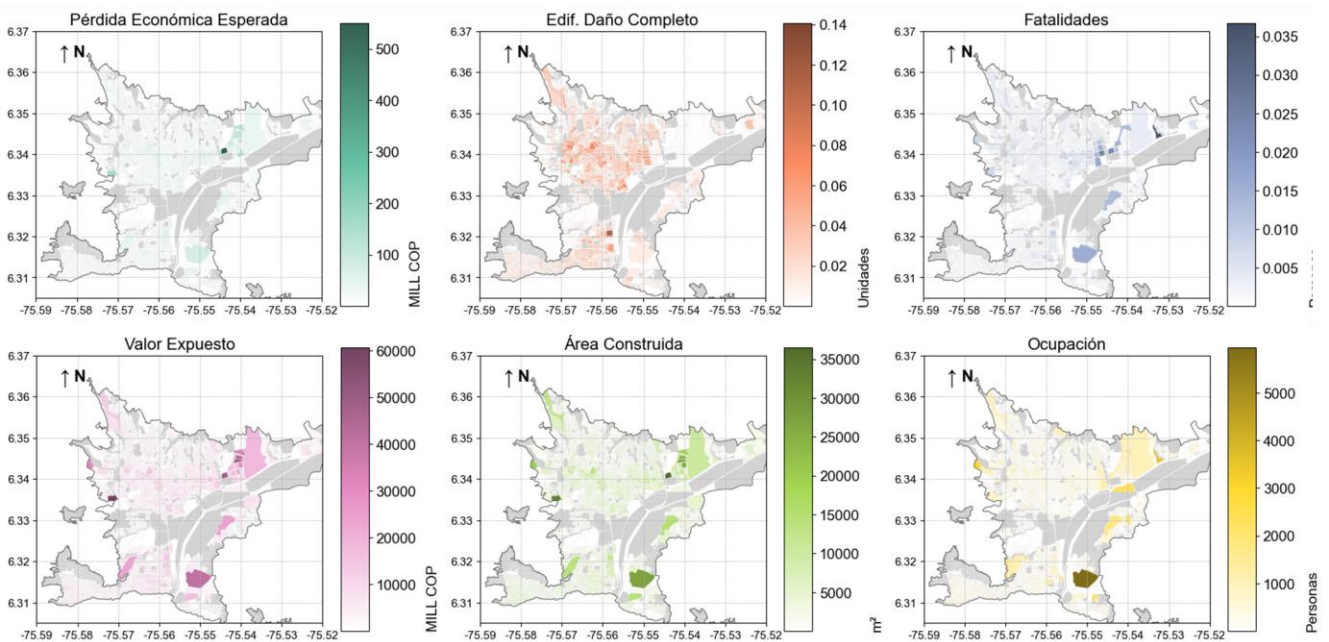


Fig. 17. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Bello (elaboración propia).

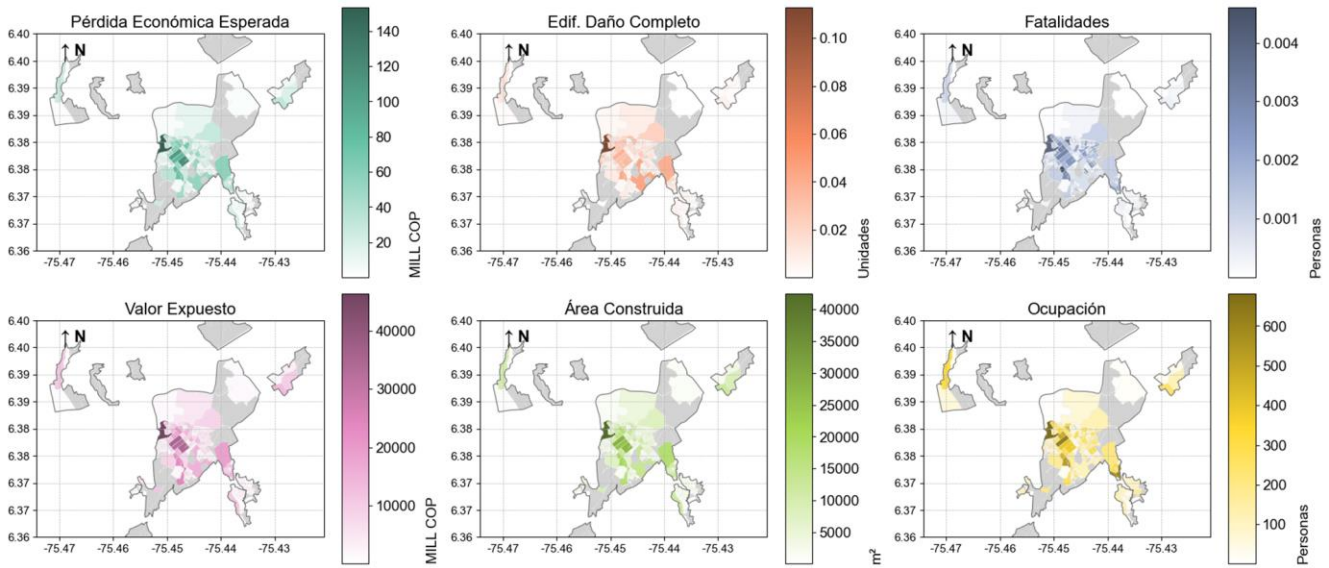


Fig. 18. Mapas de afectaciones (superior) y exposición (inferior) para Girardota (elaboración propia).

Por último, la Fig. 19 presenta los mapas de pérdida económica y exposición debidos a la taxonomía MA/MNR/ND/H:3 para los tres municipios, que es la taxonomía que mayor valor expuesto y pérdidas económicas genera. Al contrastar con los mapas de riesgo totales se identifica que las zonas de mayores pérdidas y exposición (considerando la totalidad de las tipologías) generalmente coinciden con las zonas de mayor pérdida y exposición para esta taxonomía.

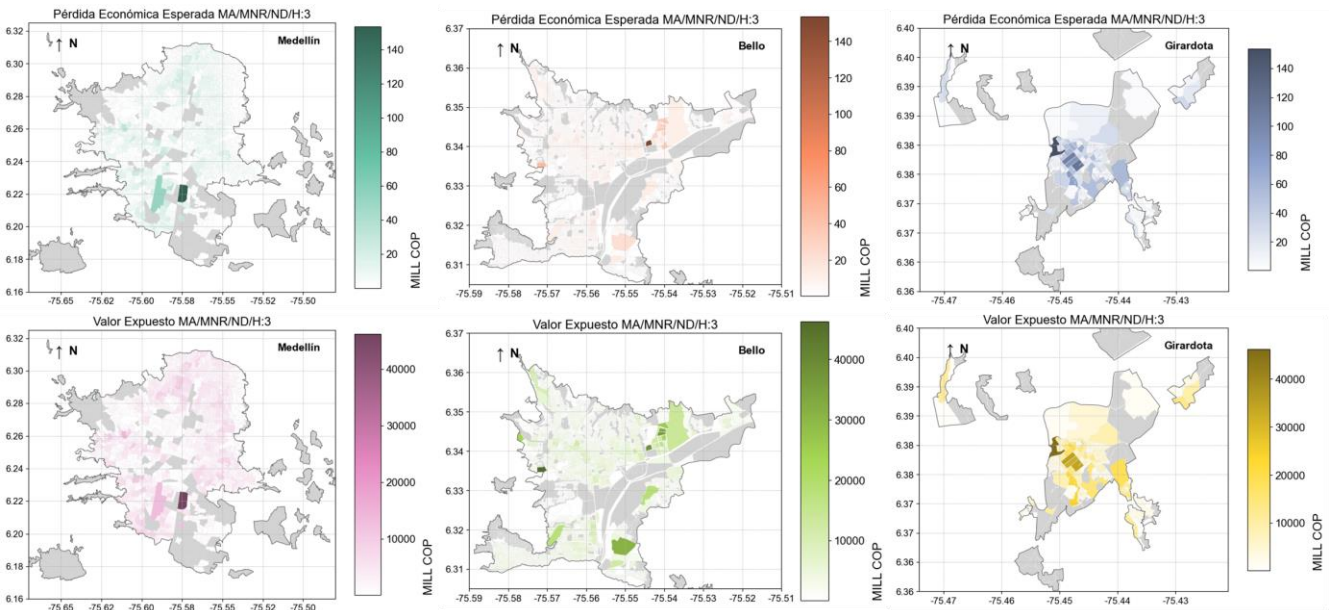


Fig. 19. Mapas de riesgo y exposición de la taxonomía MA/MNR/ND/H:3 para los municipios estudiados (elaboración propia).

### 5.3.3. Definición de procedimientos metodológicos

Para el análisis de sensibilidad desarrollado en el presente trabajo se realizaron 18 análisis de riesgo por municipio, considerando seis distribuciones espaciales y tres métodos de selección de vs30, como se detalla en la Tabla 8.

*Tabla 8. Procedimientos metodológicos*

Análisis	Método de selección de vs30	Distribución espacial	
1	Centroide geométrico	Malla	500 m
2			750 m
3			1000 m
4		Geográfica	Sección
5			Sector
6			Municipio
7	Modal	Malla	500 m
8			750 m
9			1000 m
10		Geográfica	Sección
11			Sector
12			Municipio
13	vs30 diferenciado	Malla	500 m
14			750 m
15			1000 m
16		Geográfica	Sección
17			Sector
18			Municipio

Para los métodos de selección de vs30 se tuvieron en cuenta los previamente descritos en el apartado 5.2: centroide, modal y diferenciado. En cuanto a la exposición, esta se agregó de seis formas diferentes (tres geográficas y tres de malla) como se describió en 5.1.1. A nivel geográfico y siguiendo las divisiones del Marco Geoestadístico Nacional (MGN) [35] se agrupó la exposición a nivel de municipio, sector y sección. Para las mallas se consideraron cuadrados con lado de 1.00 km, 0.75 km y 0.50 km. En cada análisis se calcularon las métricas de riesgo relacionadas con la pérdida económica, el número de fallecidos y el número de edificios con daño completo.

## 6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan diferentes análisis que permiten hacer una evaluación detallada de la precisión y distribución de los errores observados en las estimaciones de riesgo realizadas con los diferentes parámetros considerados (unidades de agregación y modelos de suelo). El análisis de los errores, obtenidos al comparar los resultados de cada análisis con el modelo de referencia (mayor resolución posible), permite determinar la viabilidad de usar distribuciones espaciales más gruesas sin sacrificar la calidad de las estimaciones del riesgo.

Los gráficos entregan de una forma visual y más clara los datos y los resultados, facilitando la identificación de patrones y tendencias en los errores. Al analizar los datos y la precisión de las estimaciones desde diferentes tipos de análisis, se busca obtener una evaluación profunda del análisis de sensibilidad que se realizó.

### 6.1. ERRORES RELATIVOS

La Fig. 20 muestra el porcentaje de error relativo en la estimación de la PAE, el cual se calcula al comparar la corrida de referencia con las demás pertenecientes al análisis de sensibilidad, mediante la ecuación 3. Valores positivos indican sobreestimación de resultados; por su parte, valores negativos indican sobreestimación. Los resultados se muestran para los tres municipios: Medellín, Bello y Girardota, segmentados por diferentes niveles de agregación espacial (municipio, sector, sección, y áreas con dimensiones de 1x1 km, 0.75 x 0.75 km y 0.5 x 0.5 km). Cada color y símbolo representan uno de los métodos empleados para considerar el modelo de suelo.

El error relativo se calcula a partir de la ecuación (3):

$$\% \text{ Error}_{\text{relativo}} = 100 \cdot \frac{\text{métrica}_{\text{evaluada}} - \text{métrica}_{\text{referencia}}}{\text{métrica}_{\text{referencia}}} \quad (3)$$

Para Medellín se presentan picos de error significativo para los procedimientos donde el vs30 es seleccionado en el centroide con un valor único, alcanzando valores hasta del 136% y 60% cuando se consideran las unidades de agregación de municipio y malla de 1 km x 1 km. Este resultado indica una gran sobreestimación de las pérdidas, a excepción de la agregación a nivel de sección y en la malla de 0.5 x 0.5 km. Se observa una importante disminución del error cuando se considera el modelo de suelo a partir de la moda o diferentes valores de vs30. En general para Medellín se identifica que hay una disminución significativa del error al usar unidades de agregación más refinadas. También se identifica que la mayoría de los errores relativos son positivos, lo que indica una sobreestimación de las pérdidas. Bello muestra un comportamiento similar a Medellín; sin embargo, los picos de error no son de tanta magnitud (46% cuando se considera la agregación en un único punto del municipio considerando el valor de vs30 de dicho punto). Al igual que para Medellín, se observa una disminución importante del error al considerar la moda de vs30 y diferentes valores de este parámetro. Excluyendo los casos donde se considera el valor de vs30 en el centroide de la unidad de agregación se observa que la variabilidad entre los diferentes errores no es tan alta, presentando un comportamiento más homogéneo.

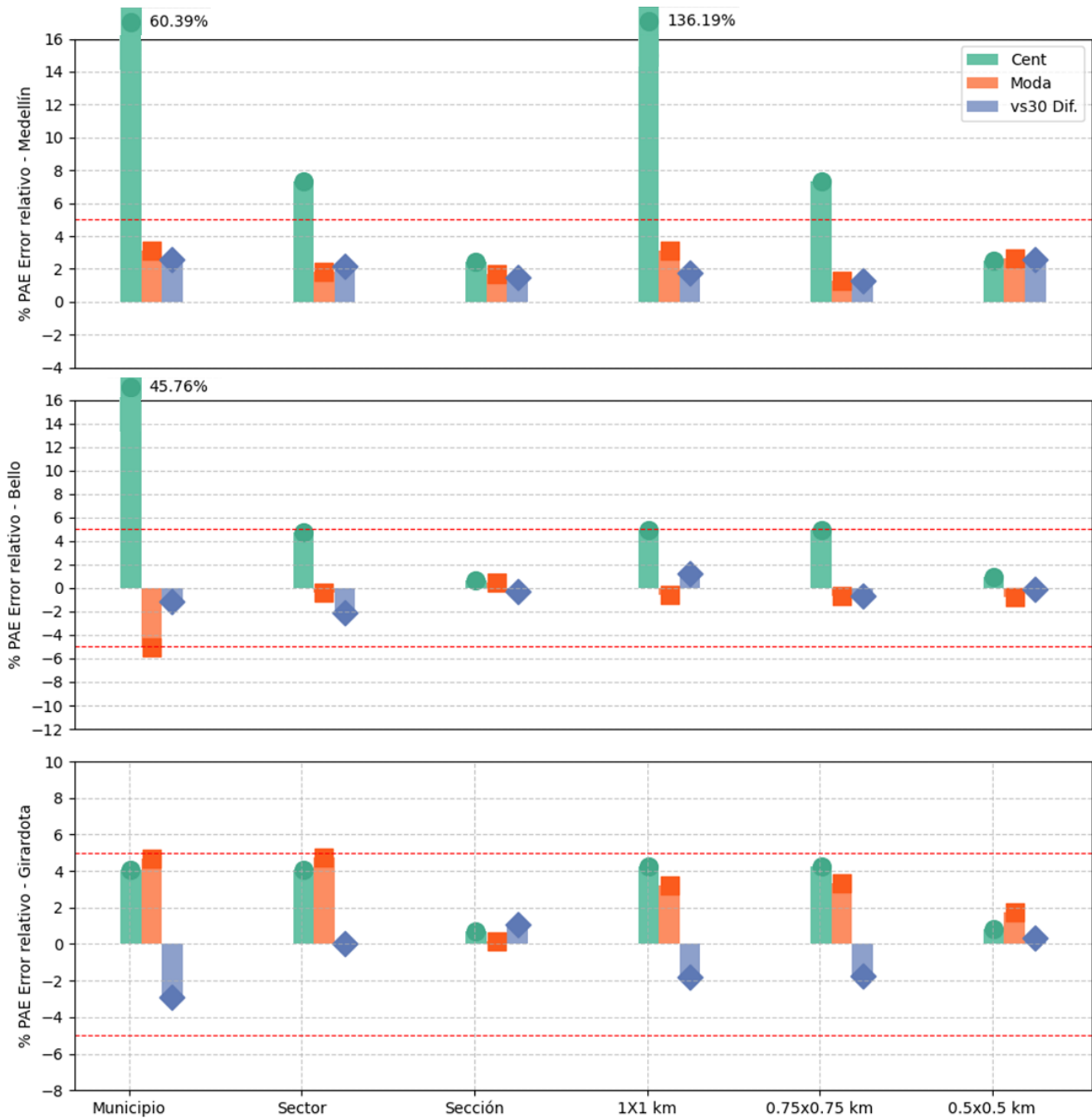


Fig. 20. Errores relativos de la estimación de la PAE para los diferentes análisis (elaboración propia).

Por otro lado, para Girardota, siendo el municipio de menor área, se evidencia que los errores son menores al 5% en todos los casos, siendo los mayores picos de error para el vs30 seleccionado en centroide y con el método modal; estos errores son todavía más altos cuando se agrega el modelo de exposición a los mayores niveles (municipio, sector). Para el análisis es importante destacar que Girardota, además de ser el municipio más pequeño, es el que mayor uniformidad presenta en las condiciones del suelo, siendo más del 60% del terreno de una misma clase.

Luego de evaluar los errores relativos para la PAE, también se evaluaron los errores para las estimaciones de número de edificios con daño completo (PAE\_DC; Fig. 21) y de fatalidades (PAE\_F; Fig. 22) encontrando que el comportamiento para estas dos métricas de riesgo es bastante similar al de la PAE. Los errores aumentan al estimar estas dos métricas, pero se mantienen los picos de error al usar un único valor de vs30, tanto modal como en centroe. Es importante tener en cuenta que las estimaciones del número de edificios con daño completo y de fatalidades están relacionadas entre sí: el modelo de afectaciones humanas considera que solo aquellas edificaciones con daño completo pueden generar fatalidades (esto lo hace a través de un modelo que relaciona, para cada tipología, la probabilidad de causar la muerte cuando el edificio tiene daño completo). Por lo anterior, la distribución de errores para PAE\_DC y PAE\_F tienen un comportamiento muy similar.

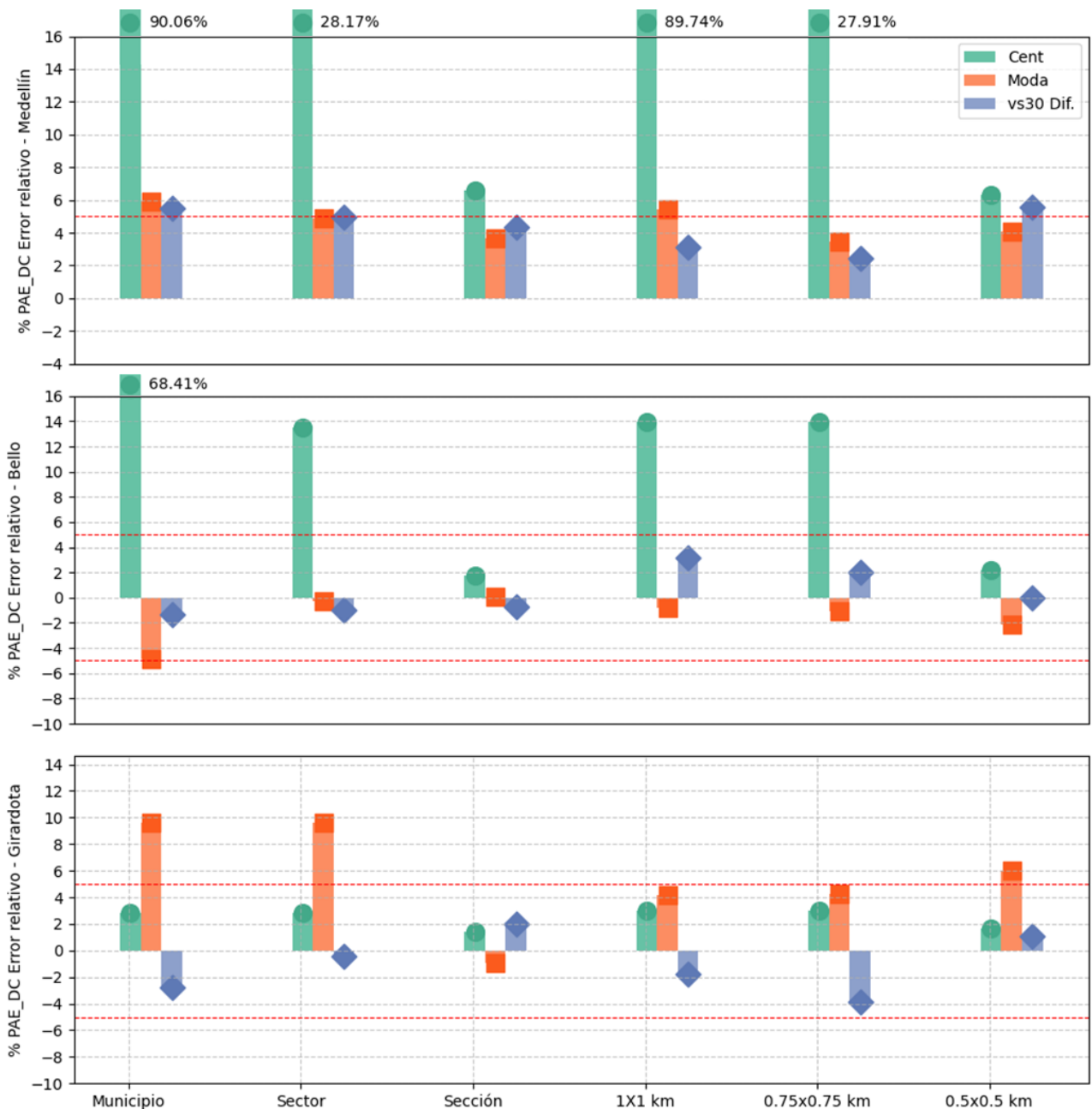


Fig. 21. Errores relativos de la estimación de la PAE\_DC para los diferentes análisis (elaboración propia).

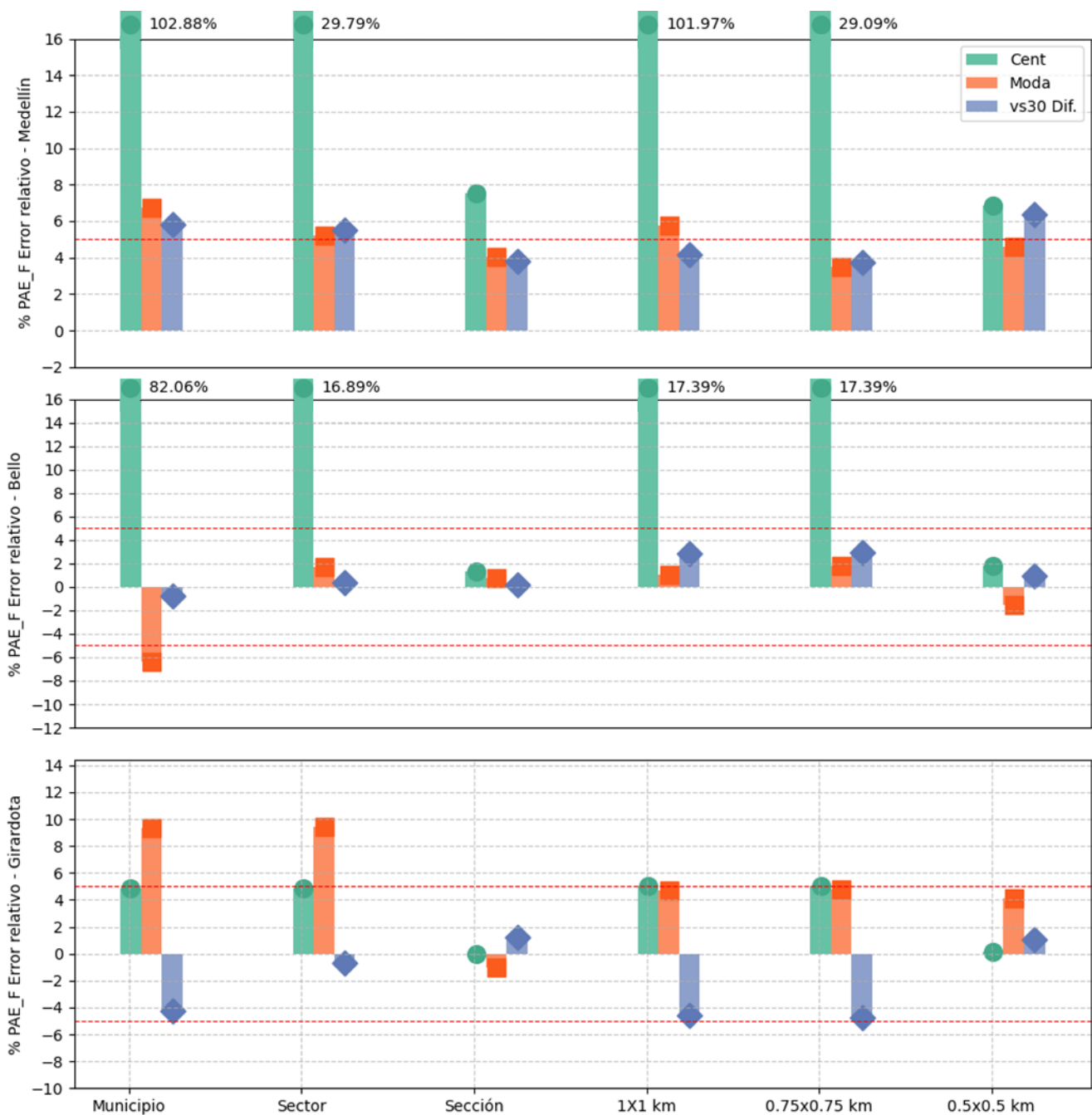


Fig. 22. Errores relativos de la estimación de la PAE\_F para los diferentes análisis (elaboración propia).

## 6.2. ERRORES ASOCIADOS AL ÁREA DE LAS UNIDADES

La Fig. 23 muestra la distribución que tienen los errores relativos de la pérdida anual esperada para las tres variables consideradas (PAE, PAE\_DC y PAE\_F) para los tres municipios estudiados en función del área promedio de las diferentes unidades de análisis, tanto las geográficas como las mallas. Estos errores se obtienen mediante el cociente de la afectación y el valor expuesto (pérdida económica/valor expuesto, número de edificios con daño completo/total de edificios, número de fatalidades/población).

Los tres municipios muestran de forma general una tendencia al aumento de la media y la mediana del error relativo con el aumento del área promedio de las unidades, especialmente en Medellín y Bello, siendo el error por la agregación a nivel municipal el que más marca esta tendencia ascendente. Lo anterior sugiere que una agregación a unidades de mayor área puede inducir a una pérdida de precisión en las estimaciones.

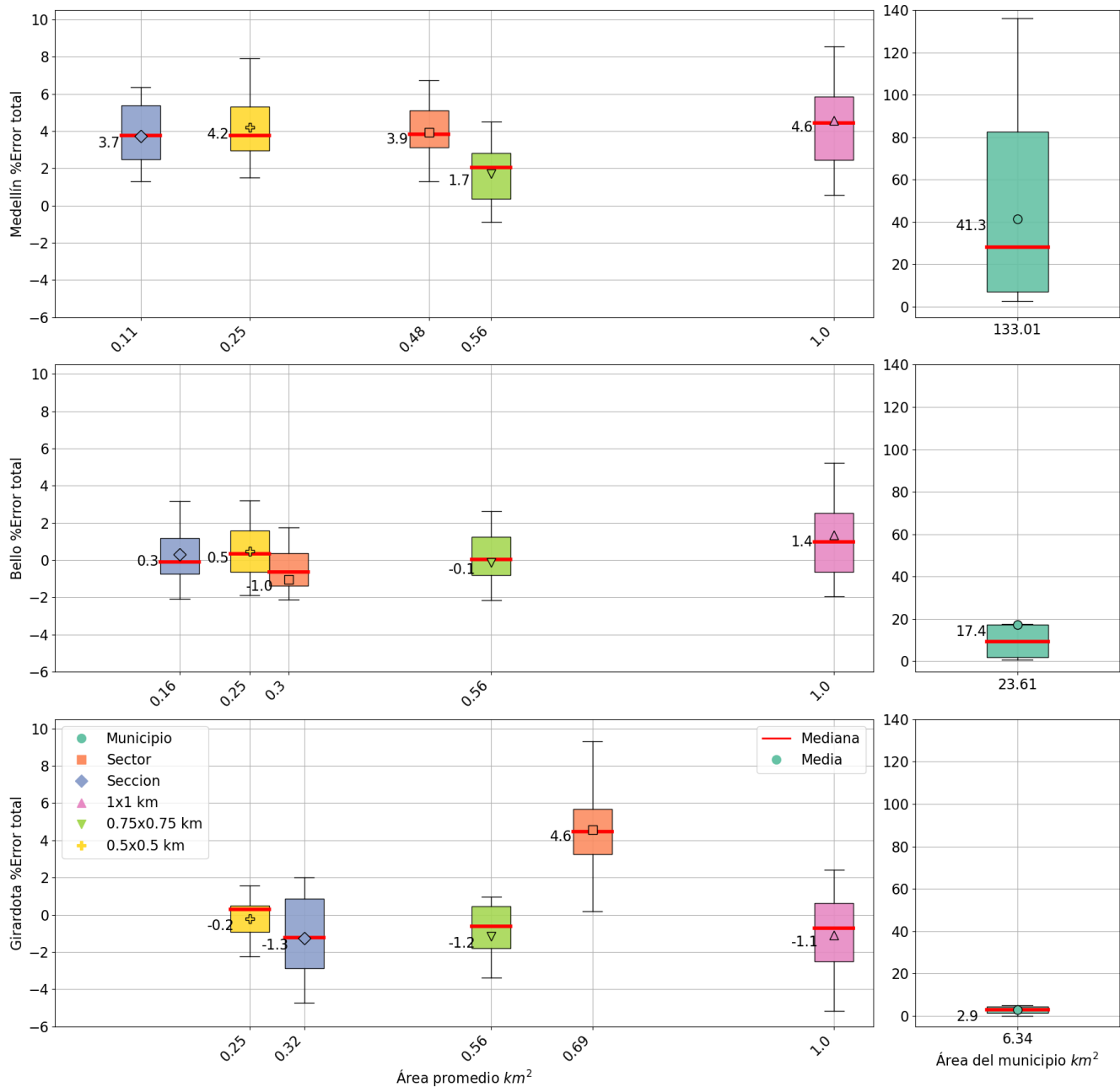


Fig. 23. Errores relativos promedio asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia).

Adicionalmente, se identifica que el área total del municipio parece influir en las magnitudes de los errores: en el caso de Medellín este presenta errores considerablemente más altos, mientras que en municipios de menor área las distribuciones de error son de magnitudes más controladas, probablemente dada su extensión y complejidad geográfica.

En la Fig. 23 se muestra el error promedio de todas las estimaciones de las diferentes métricas de riesgo, en los anexos C a E se muestran como los errores asociados a cada una de las métricas se relacionan con las áreas promedio de las unidades. En estos se presenta un comportamiento muy similar al de los errores promedio; no obstante, se destaca que las PAE tienen errores con una distribución mucho más homogénea, mostrando un rango intercuartil (IQR) de los errores mucho menor al de los demás municipios. Adicionalmente, se identifica que la magnitud de los errores asociados a las PAE es menor que la magnitud de los errores asociados a las otras dos métricas.

### 6.3.ERRORES DISTRIBUIDOS ESPACIALMENTE

Las Fig. 24, 25 y 26 muestran la distribución espacial de los errores asociadas a las tres métricas de riesgo evaluadas para Medellín, Bello y Girardota, respectivamente. Las Figuras muestran los resultados para los modelos de sitio desde el más simple al más complejo (vs30 en centroide y diferenciado) con el modelo de exposición agregado a nivel de municipio y de sección, los demás mapas de error se encuentran en los anexos F a N. Estos errores se muestran distribuidos espacialmente en secciones y se calculan como la diferencia entre la suma de las pérdidas de todos los elementos presentes en una sección para un método y la suma de las pérdidas de todos los elementos presentes en la misma sección para la corrida de referencia. Cabe mencionar que, para estos mapas, los bloques grises muestran lugares donde no se realizaron análisis dada la ausencia de elementos expuestos.

De forma general se identifican errores de mayor magnitud al comparar los mapas realizados con un único valor de vs30 con los mapas realizados con valores de vs30 diferenciados, observando una menor concentración de los valores extremos y una distribución más uniforme en el análisis más detallado de las propiedades del suelo. La diferenciación de vs30 entrega tanto una mejor distribución espacial del error como una mejor estimación promedio de las métricas (apartado 6.2), incluso al emplear una agregación del modelo de exposición a nivel de municipio. Esta diferencia es más notable particularmente para Medellín, que es el municipio de mayor área y para el cual se obtienen los errores de mayor magnitud al tomar el valor de vs30 del centroide.

Al evaluar los mapas donde se usa un único valor de vs30 del centroide se evidencia que los errores parecen ser mucho más pronunciados en algunas zonas, lo que indica una falta de sensibilidad a las variaciones locales de las condiciones del suelo. Esto es todavía más evidente al agregar el modelo de exposición a nivel de municipio, donde los errores son mucho mayores en las zonas periféricas de los municipios, es decir, las zonas alejadas al punto se realiza el análisis. Nuevamente Medellín es el municipio donde es más evidente este efecto; Bello y Girardota reflejan un comportamiento similar, pero con menor variabilidad, esto debido al tamaño y las características de los tres municipios.

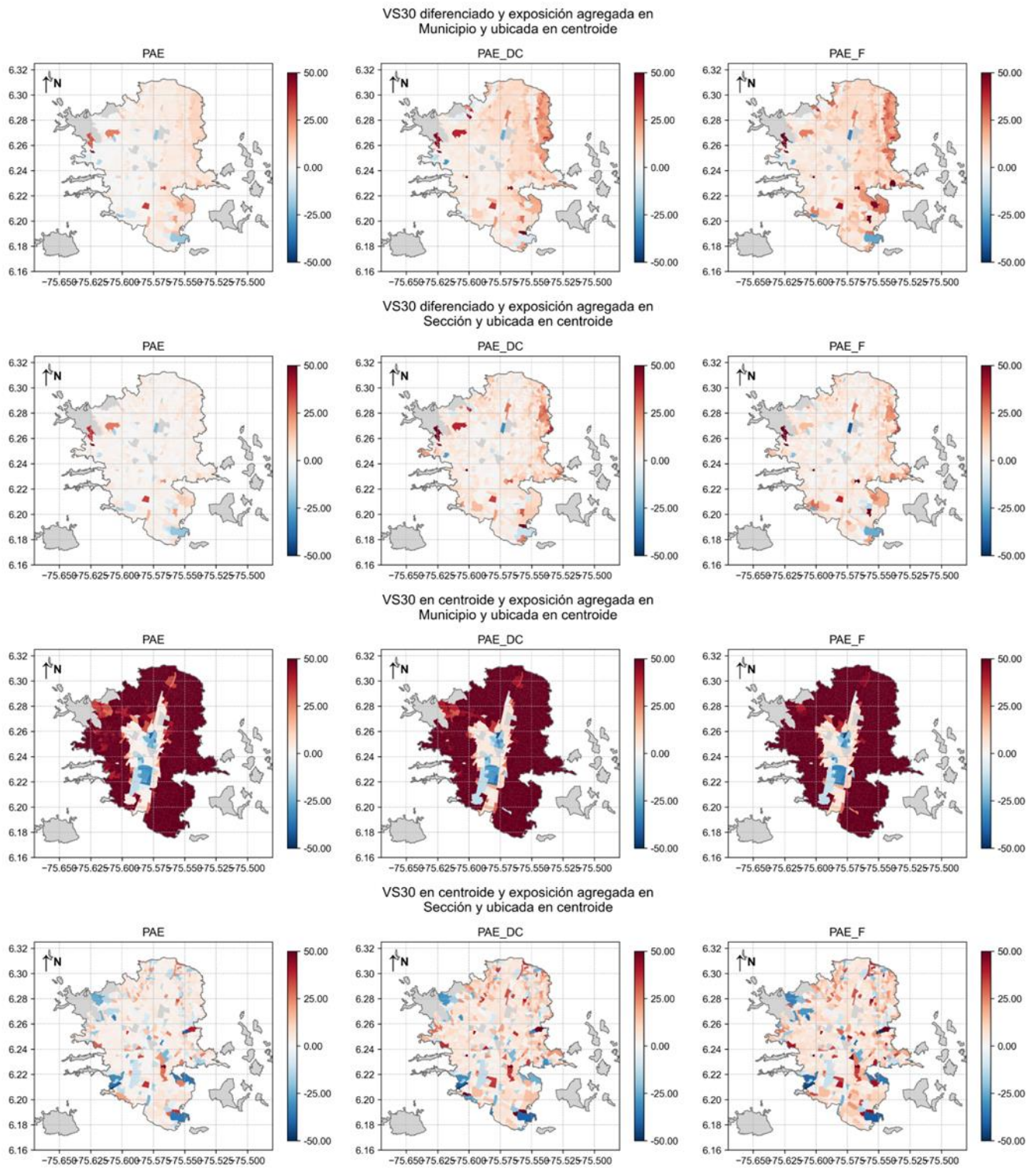
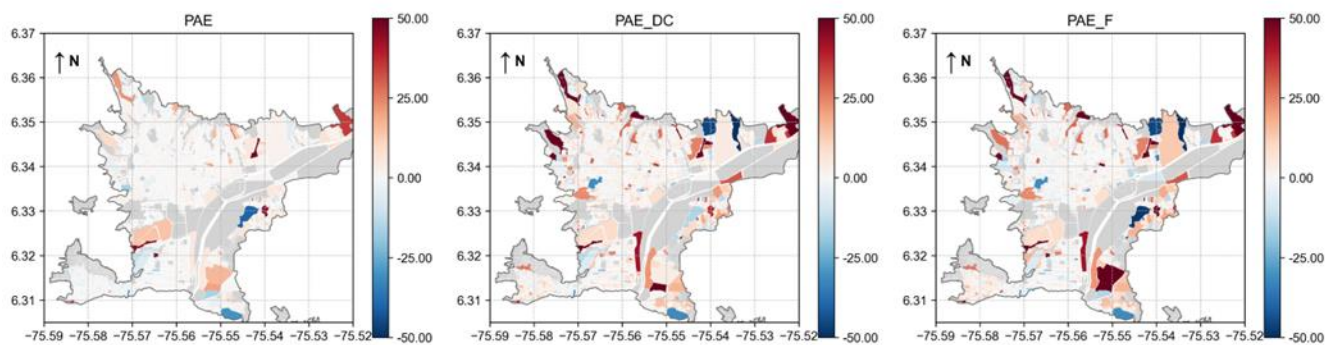
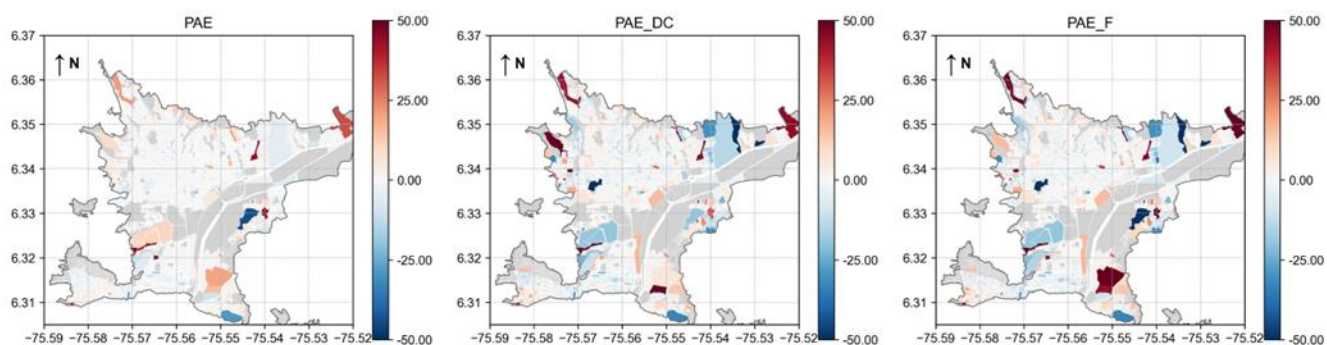


Fig. 24. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Medellín con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).

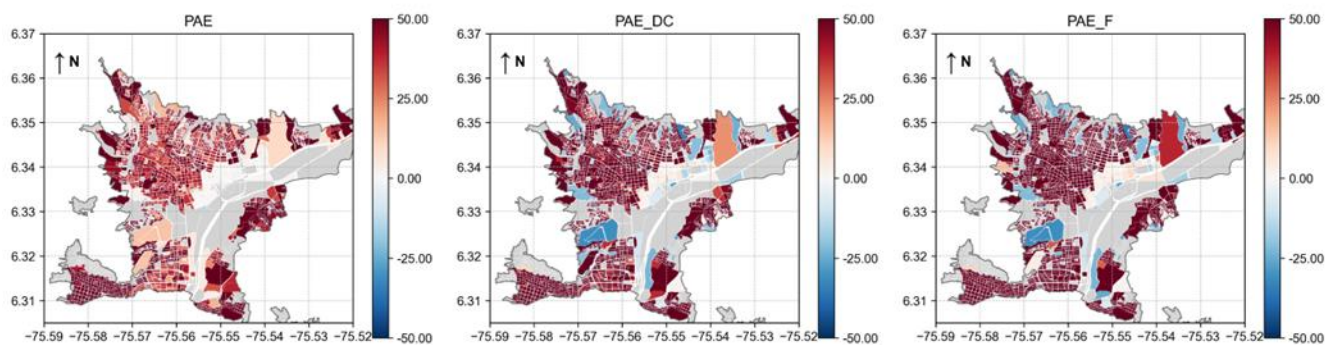
VS30 diferenciado y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 diferenciado y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

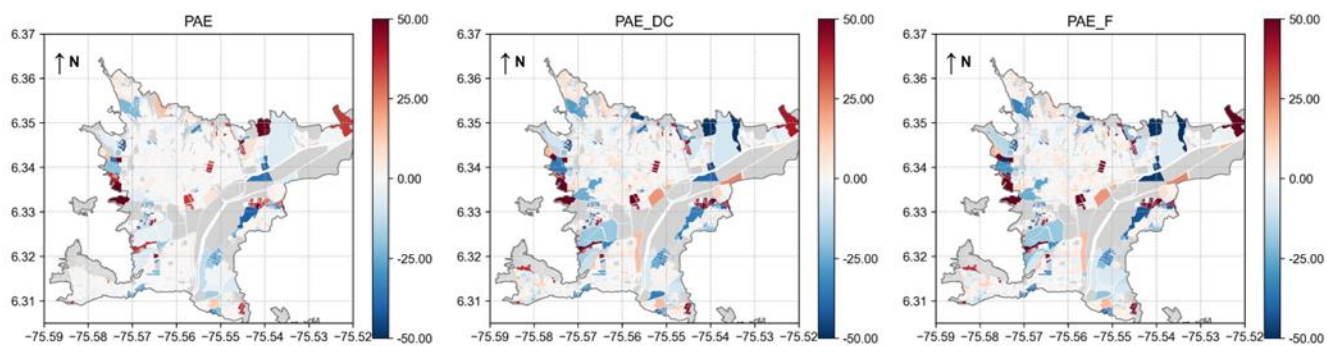
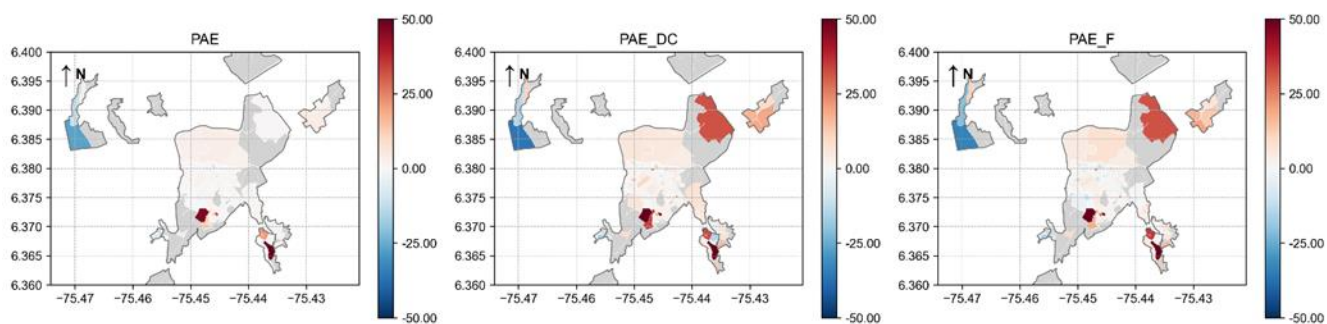
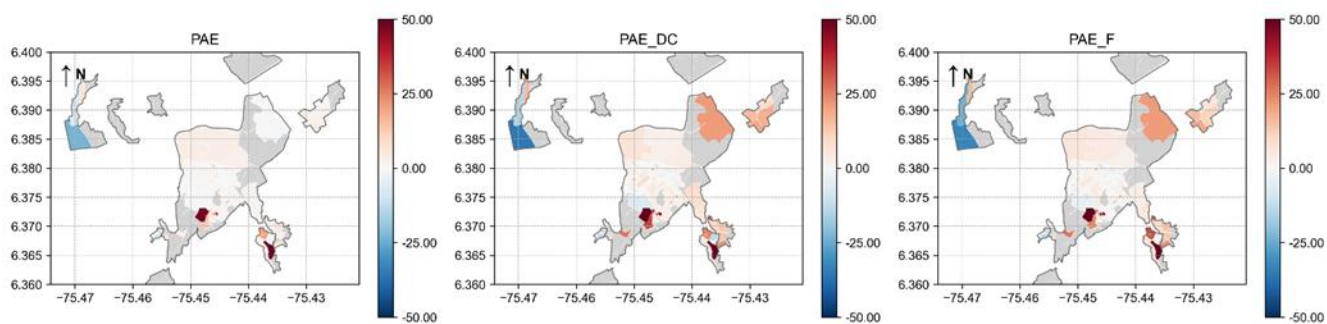


Fig. 25. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Bello con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).

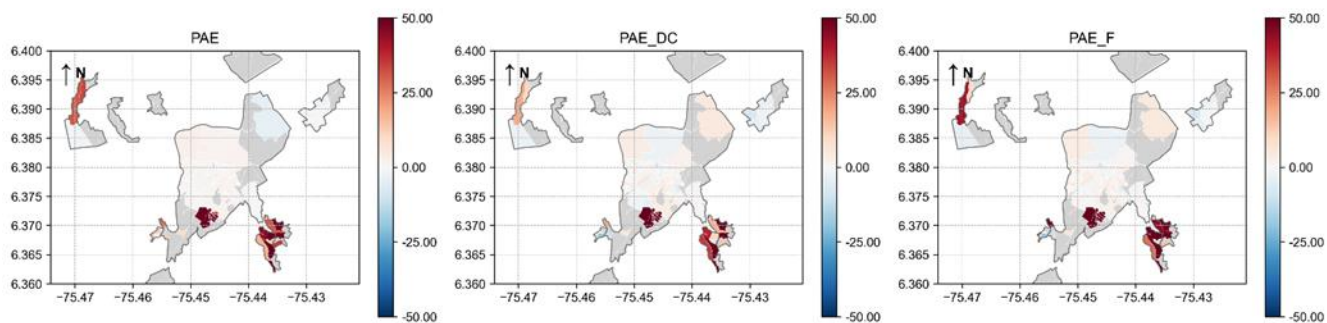
VS30 diferenciado y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 diferenciado y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

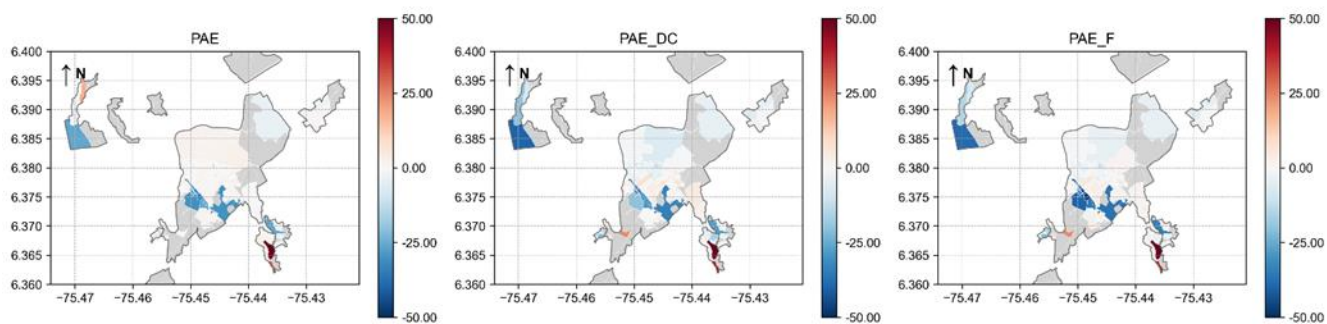


Fig. 26. Distribución espacial del error en las estimaciones de las métricas de riesgo para Girardota con vs30 diferenciado y en centroide para la exposición agregada a nivel de municipio y de sección (elaboración propia).

Por último, de la distribución espacial del error se destaca que, al comparar las unidades de agregación del modelo de exposición, es decir, su distribución espacial, los resultados indican que una resolución espacial más fina mejora las estimaciones y permite que se capturen variaciones locales, reduciendo así los errores asociados. No obstante, la reducción de error asociada al método de selección del vs30 muestra diferencias entre las magnitudes de error mayores.

#### 6.4.FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA

La función de distribución acumulativa empírica (FDAE), mejor conocida por sus siglas en inglés “ECDF”, es una herramienta estadística útil al momento de analizar y representar la distribución acumulada de una serie de datos, en este caso el error entre las diferentes estimaciones analizadas y las estimaciones con el modelo de referencia. La función se usa para evaluar el desempeño que tienen los diferentes métodos a partir de una evaluación de la precisión y de la identificación de tendencias en los errores.

En la Fig. 27 se presenta un ejemplo de FDAE del error relativo, el cual se obtiene al comparar los valores del parámetro considerado (pérdida económica, número de edificios con daño completo y número de fatalidades) en cada análisis con el valor de la configuración de referencia. La curva representa, de manera acumulada, el error de cada elemento expuesto, considerando tanto errores negativos (subestimaciones) como errores positivos (sobreestimaciones). Para construir la curva se ordenan los errores relativos de todos los elementos expuestos, se calcula la proporción acumulada de elementos que presenten errores menores o iguales a cada valor y se grafican los resultados de forma acumulada.

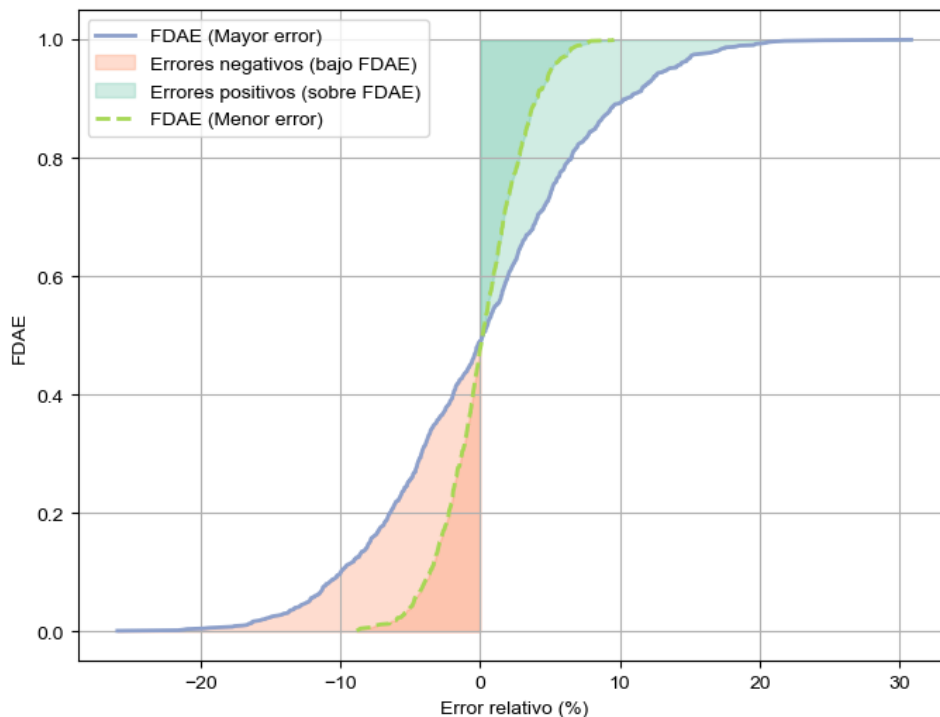


Fig. 27. Ejemplo de FDAE (elaboración propia).

La figura indica que a medida que la curva tiene una pendiente mayor, y, por consiguiente, una menor área bajo y sobre la curva, se representa una distribución que tiene menos errores asociados. Por último, se destaca que el área que se evalúa para los errores negativos (subestimaciones) es el área bajo la curva, y el área que se evalúa para errores positivos (sobrestimaciones) es el área sobre la curva.

Las Fig. 28, 29 y 30 muestran las distribuciones acumuladas del error en la estimación de PAE, PAE\_DC y PAE\_F respectivamente, al comparar los diferentes métodos con la corrida de referencia para los tres municipios estudiados. Para facilitar la comparación entre las curvas, las figuras presentan el valor del área indicada en la Fig. 27. De forma general se destaca que hay una influencia considerable en las diferentes formas de tomar el vs30 para el análisis de la amenaza, ya que los errores para el vs30 diferenciado son considerablemente menores a los demás. Adicionalmente se evidencia que al agregar el modelo de exposición en unidades de análisis más pequeñas (malla de lado de 0.5 km y secciones) se obtienen menores errores.

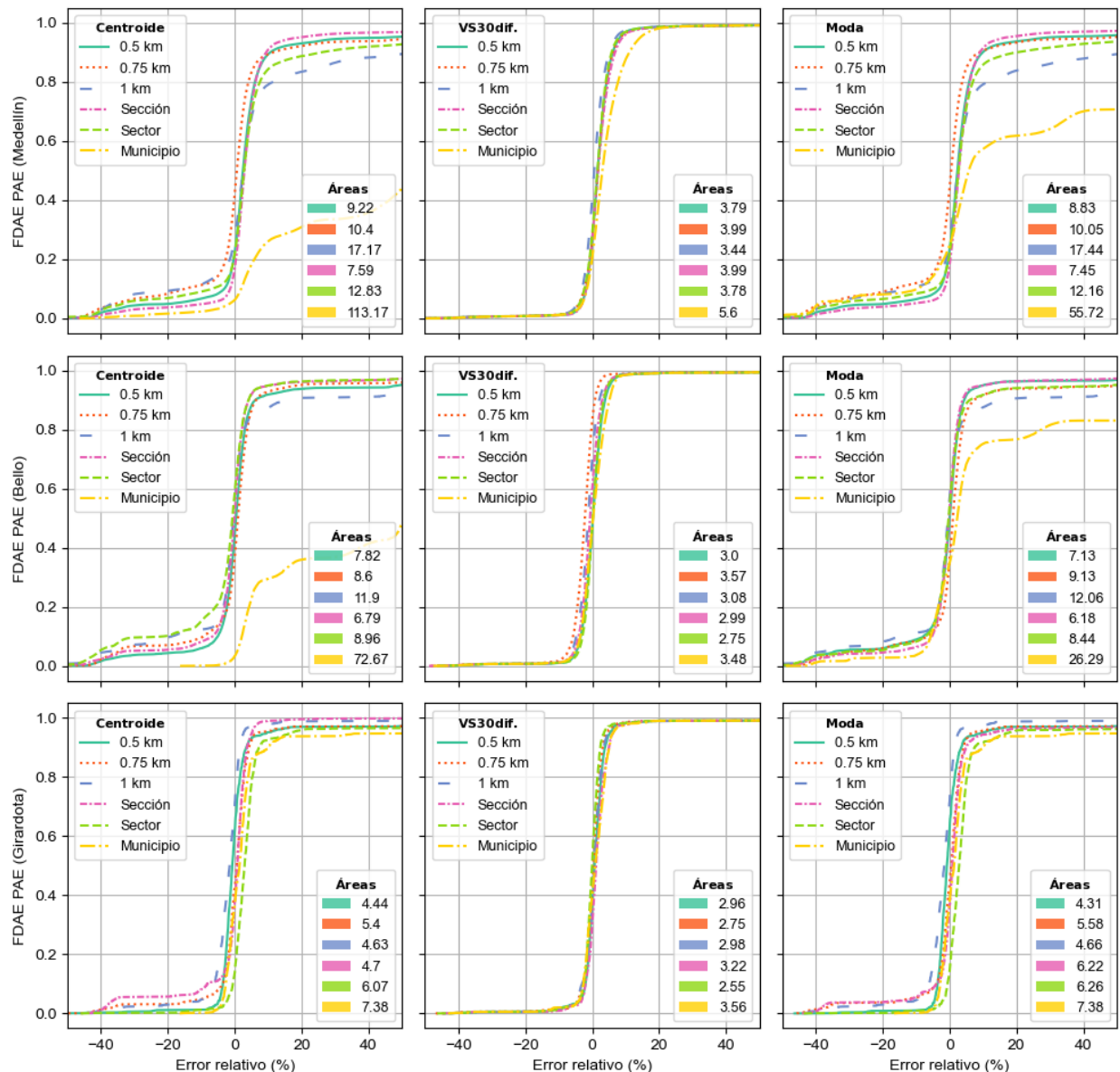


Fig. 28. FDAE del error relativo para la estimación de PAE (elaboración propia).

Los modelos más sencillos son los que usan un único valor de vs30, ya sea del centroide de la unidad o el valor modal de vs30; en las figuras se evidencia que estos entregan estimaciones con errores significativos, especialmente para Medellín y Bello, que son los municipios con mayor tamaño. No obstante, estos errores disminuyen considerablemente al realizar el análisis más completo teniendo en cuenta todos los diferentes valores de vs30 presentes en la unidad, sin influencia alguna del tamaño de los municipios, especialmente para la PAE, pero mostrando una disminución significativa del error también para PAE\_DC y PAE\_F. Adicionalmente, se evidencia que la FDAE del error relativo para PAE\_DC y PAE\_F tienen el mismo comportamiento, lo cual se debe a que, como se mencionó previamente en el apartado 6.1, la estimación de fatalidades es dependiente a la estimación del estado de daño completo.

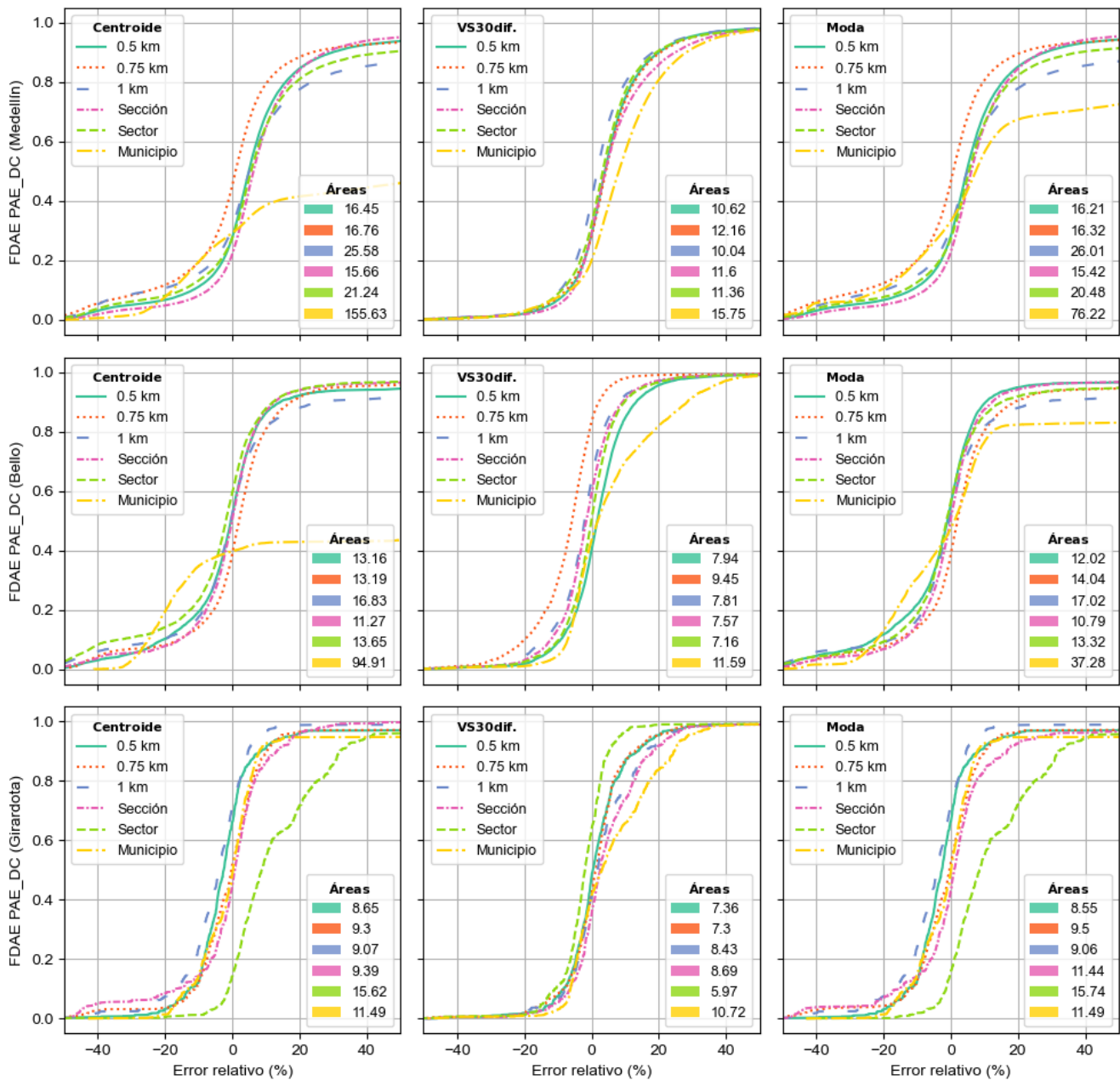


Fig. 29. FDAE del error relativo para la estimación de PAE\_DC (elaboración propia).

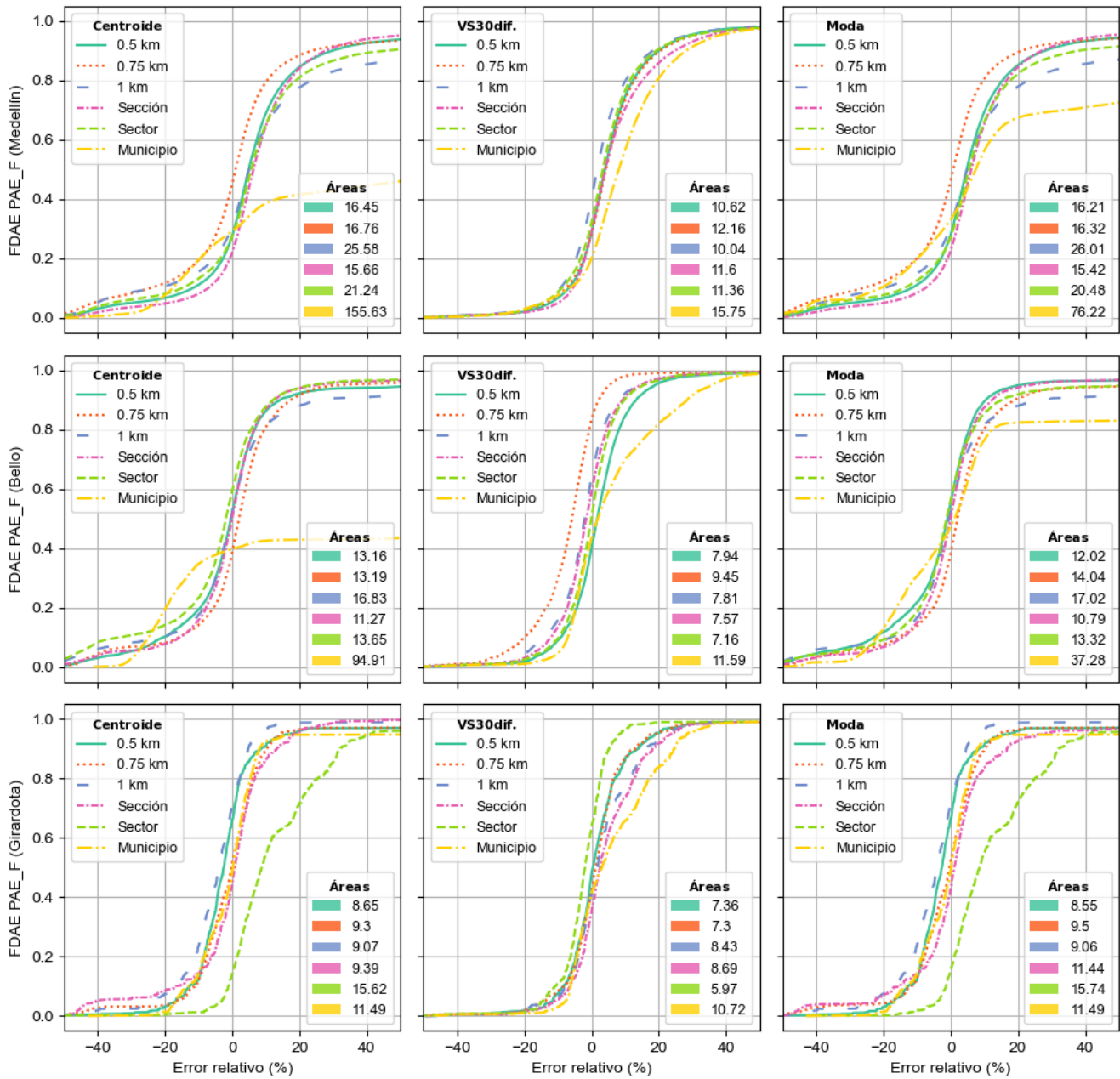


Fig. 30. FDAE del error relativo para la estimación de PAE\_F (elaboración propia).

### 6.5. CURVAS DE EXCEDENCIA

El análisis de sensibilidad también tuvo en cuenta la influencia de los parámetros estudiados en las curvas de excedencia de pérdidas, las Figs. 31, 31 y 33 muestran las curvas de excedencia de pérdidas para PAE, PAE\_DC y PAE\_F, respectivamente. De las figuras se destaca que, aunque para los errores relativos absolutos (ver figuras 20, 21 y 22) de Girardota se tiene una distribución relativamente uniforme de los mismos y un buen desempeño general (menores al 10%), las curvas de excedencia muestran que al agregar la exposición a nivel municipal y de sección se obtienen diferencias considerables a la corrida de referencia para periodos de retorno iguales o mayores a 475 años.

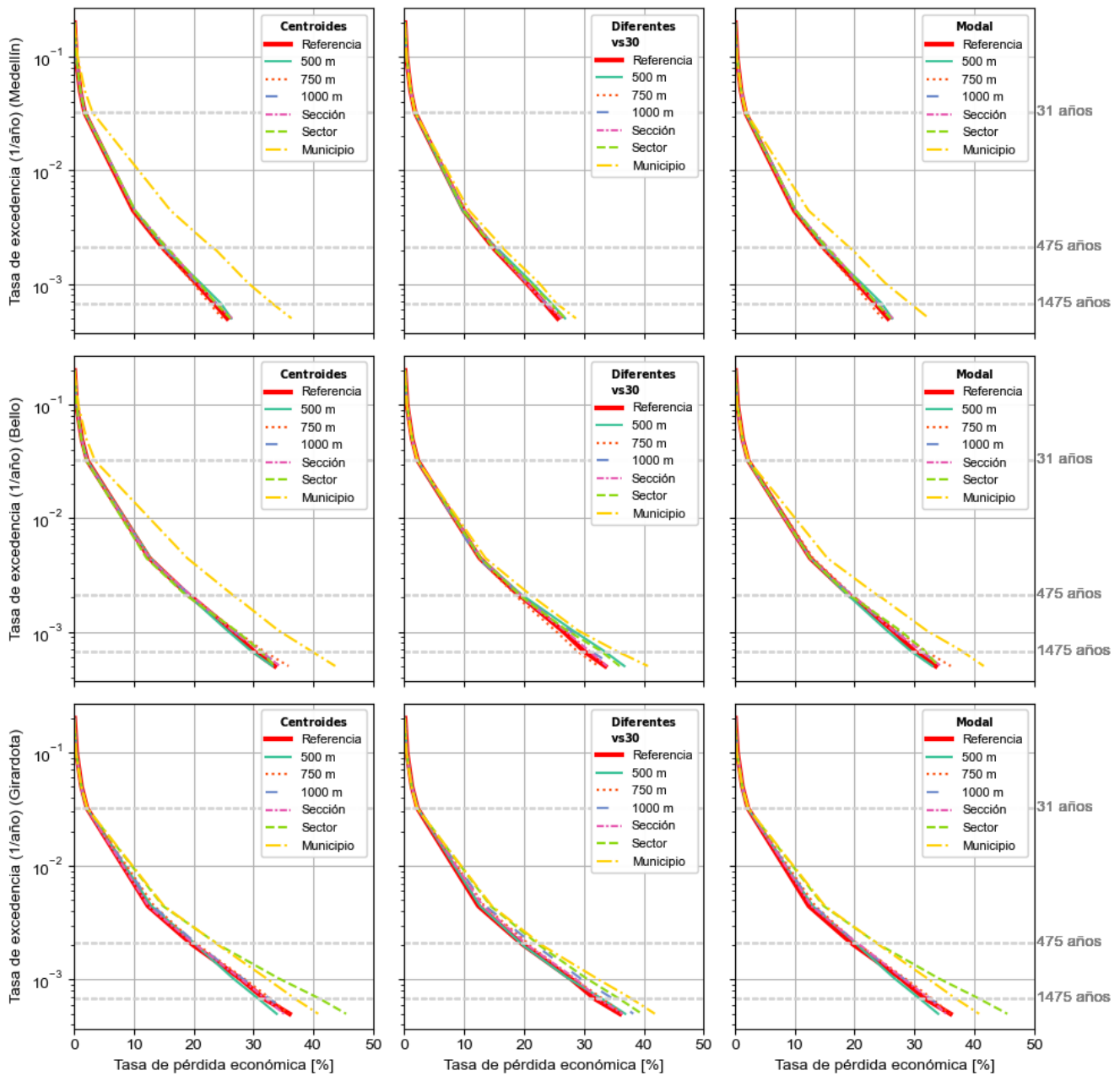


Fig. 31. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

Los resultados de forma general para los tres municipios indican que las diferencias más significativas se presentan para los periodos de retorno más largos (mayores o iguales a 475 años), siendo la diferencia todavía mayor para la agregación de la exposición a nivel de sector o municipio. Por el contrario, periodos cortos como 31 años obtienen resultados bastante aceptables para todos los casos.

En cuanto al efecto de las variaciones en el método de selección de vs30, los que usan un único valor de vs30 muestran la mayor diferencia con respecto a la referencia, siendo el método que considera la moda el de menores diferencias entre ambos; por otro lado, el método de vs30 diferencia muestra reducciones considerables de la diferencia tanto en periodos de retorno largos como cortos, siendo Medellín y Bello los que tienen mayor sensibilidad en la disminución de la diferencia. Girardota también muestra una

disminución en la diferencia, pero al estar tener una distribución más uniforme, incluso para los métodos de un único vs30, no presenta una disminución tan considerable como la de los otros dos municipios.

Por último, comparando las curvas de excedencia de pérdidas para PAE con PAE\_DC y PAE\_F se evidencia, al igual que en los errores relativos absolutos, diferencias de mayor magnitud al comparar con la referencia para las PAE\_DC y PAE\_F. Lo anterior indica que las pérdidas asociadas a las edificaciones con daño completo y a las fatalidades son más sensibles a la distribución espacial del modelo de exposición y a los métodos de selección del vs30, siendo esta sensibilidad aun mayor para periodos de retorno mayores a 475 años, donde las diferencias de las estimaciones tienen un impacto significativo en la precisión de los resultados.

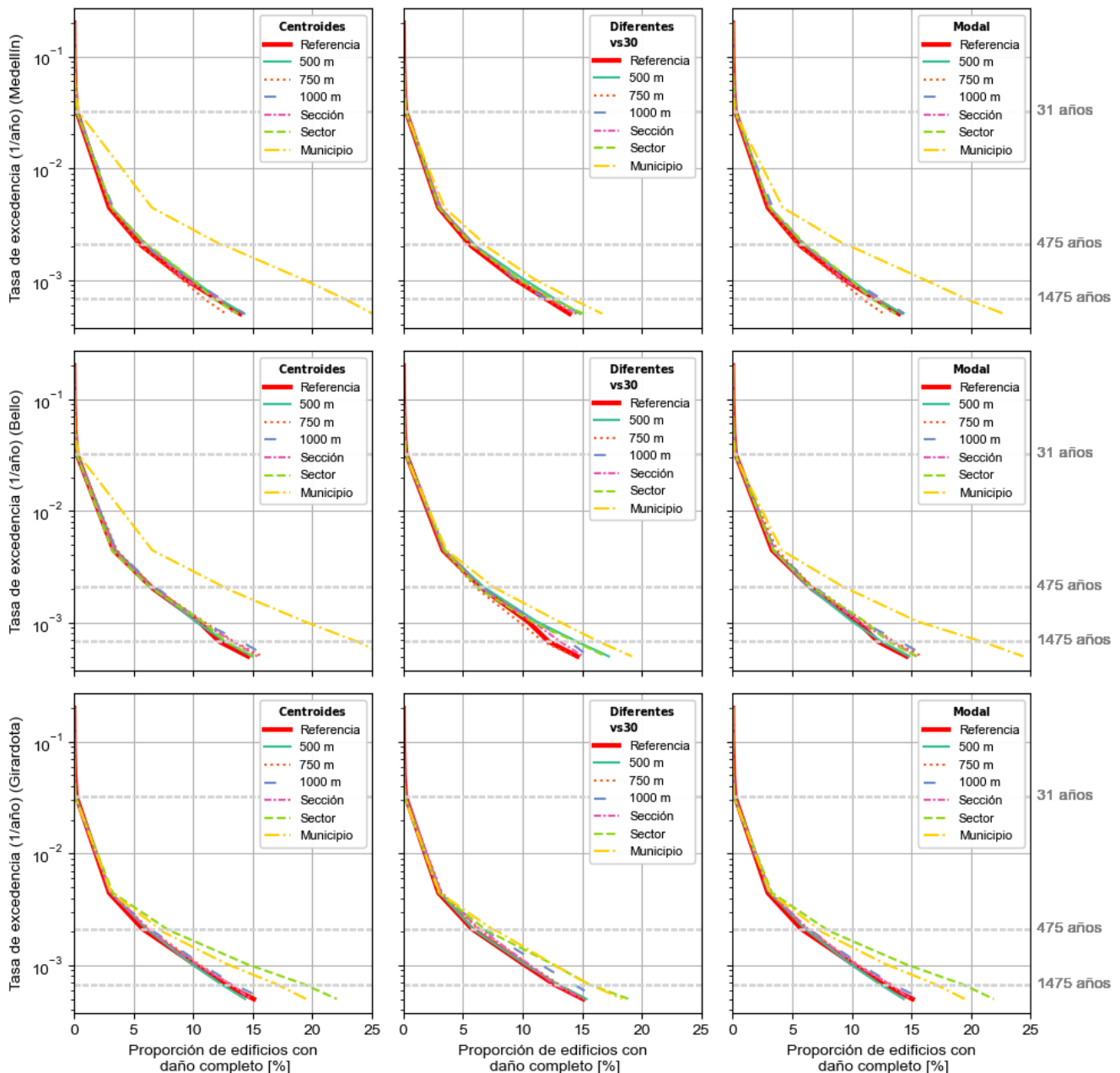


Fig. 32. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE\_DC para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

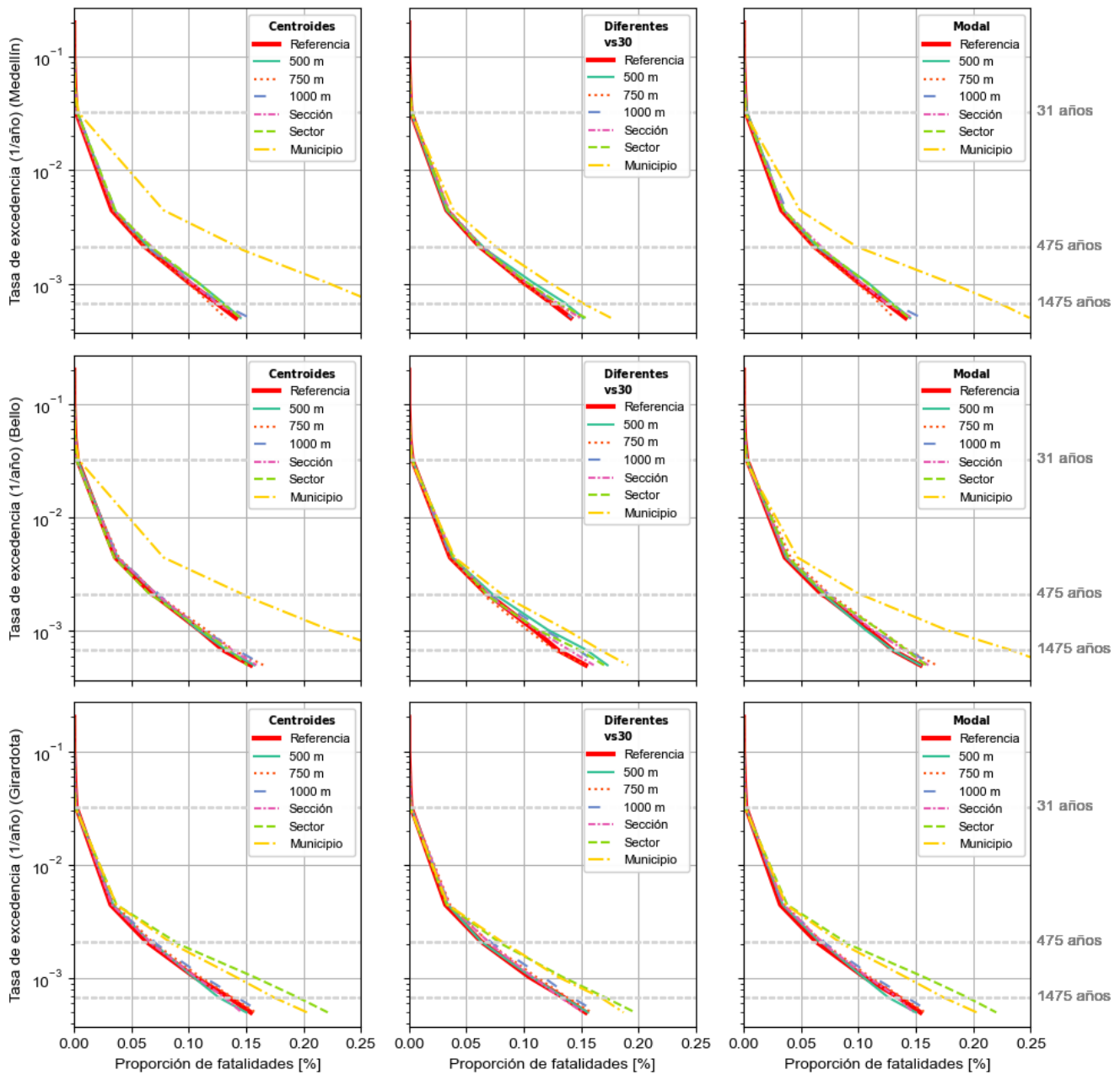


Fig. 33. Curvas de excedencia de pérdidas de PAE<sub>F</sub> para los tres municipios estudiados (elaboración propia).

A continuación, se presentan los errores asociados a seis periodos de retorno diferentes para los diferentes métodos evaluados en el análisis de sensibilidad. Las figuras 34, 35 y 36 muestran los errores para las PAE, las PAE<sub>DC</sub> y las PAE<sub>F</sub>, respectivamente. Para todos los casos, e independientemente del periodo de retorno, se observan los mayores errores al agregar el modelo de exposición a nivel de municipio y en la malla de lado de 1.00 km. Adicionalmente, se identifica que los errores en las curvas de excedencia son de mayor magnitud para Bello y Girardota, mientras Medellín muestra mayor uniformidad en la distribución de errores, a excepción de la agregación del modelo a nivel de municipio.

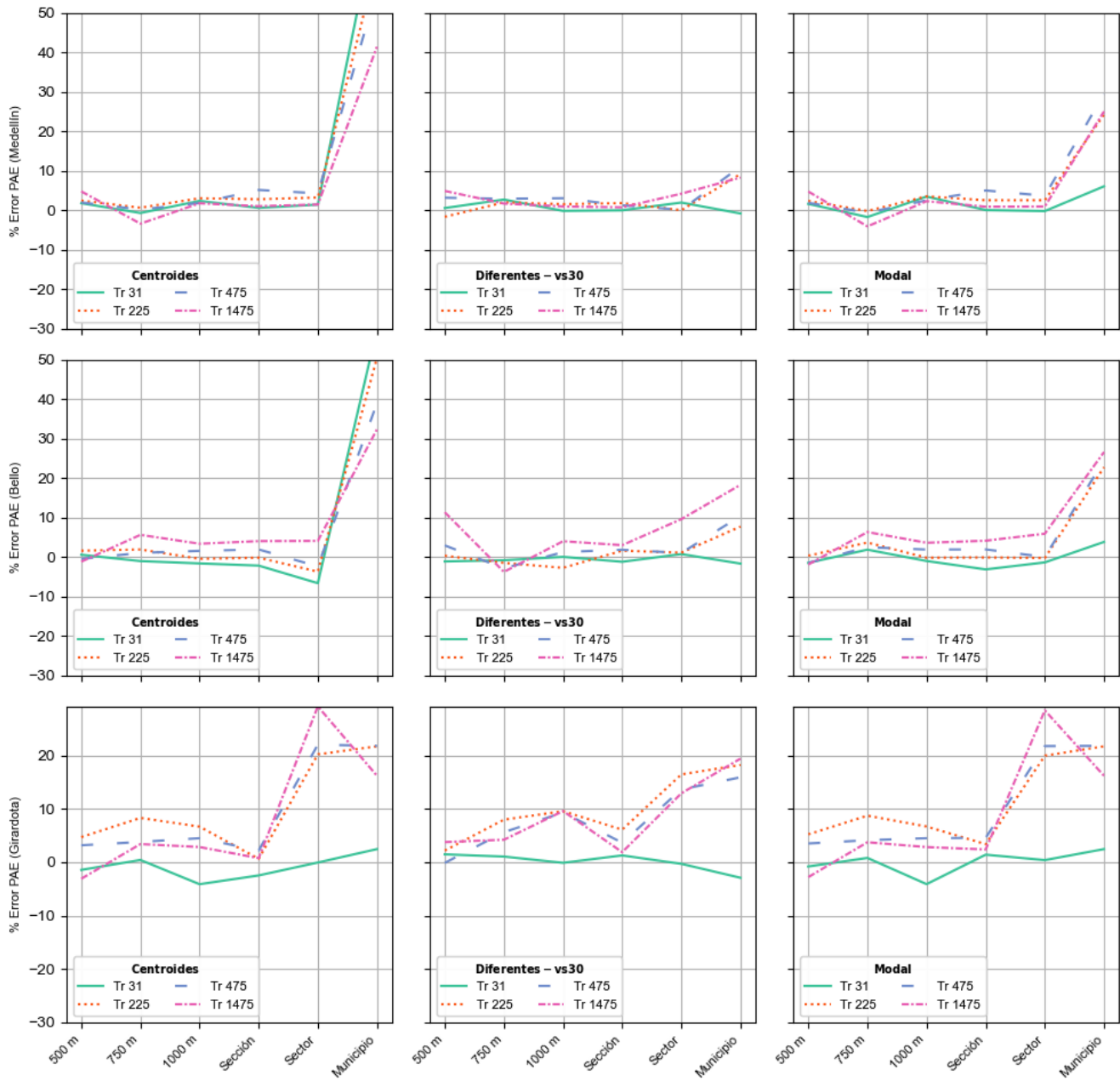


Fig. 34. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE en los tres municipios estudiados (elaboración propia).

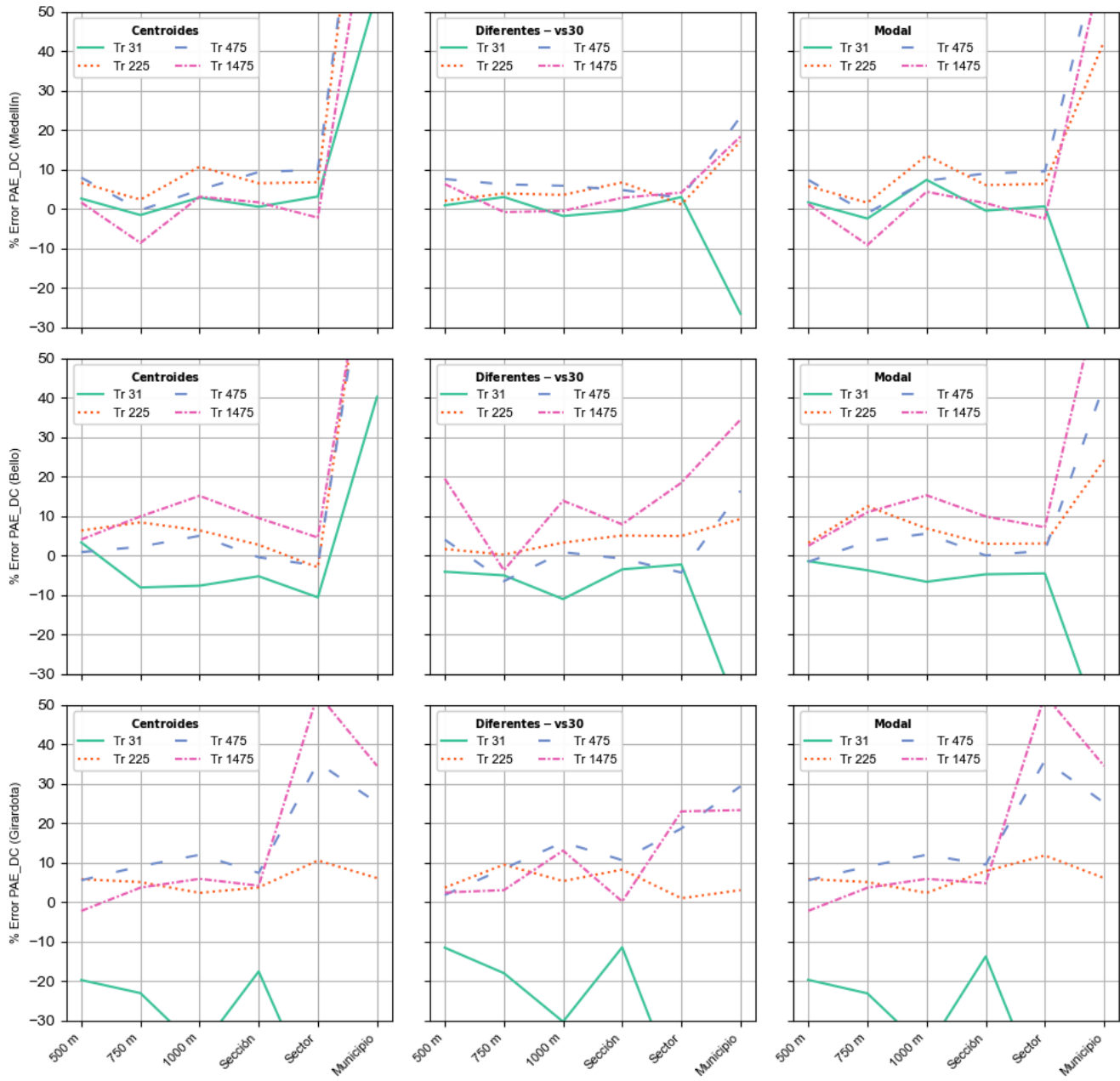


Fig. 35. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE\_DC en los tres municipios estudiados (elaboración propia).

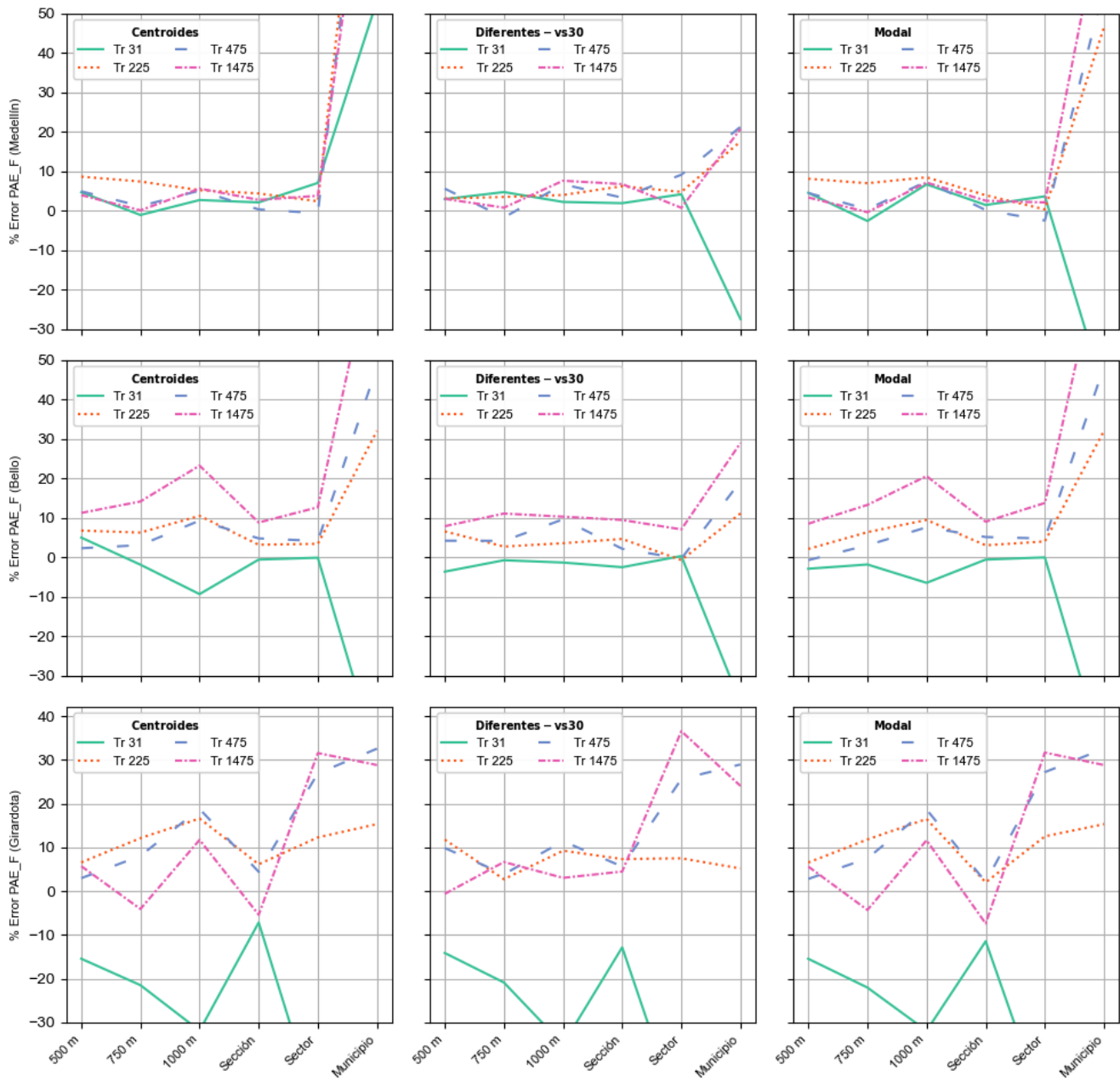


Fig. 36. Errores asociados a diferentes periodos de retorno para PAE\_F en los tres municipios estudiados (elaboración propia).

Nuevamente se identifican errores de mayor magnitud para las edificaciones con daño completo y las fatalidades. Específicamente se destaca que Girardota presenta errores considerables en las PAE\_DC y PAE\_F para periodos de retorno cortos (31 años), sin importar el nivel de agregación del modelo de exposición, siendo la agregación por sección la que menor error tiene asociado en estos periodos de retorno.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad en tres métricas de riesgo (pérdidas económicas, número de edificios con daño completo y número de fatalidades) para tres municipios del departamento de Antioquia: Medellín, Bello y Girardota. Para la evaluación del riesgo sísmico se dejó invariante, en todos los casos, los modelos de amenaza y fragilidad/vulnerabilidad. El análisis de sensibilidad consideró 18 formas de agregación del modelo de exposición para cada municipio, en donde se consideraron seis unidades de agregación y tres formas de modelar los efectos del suelo.

Al caracterizar los municipios de Medellín, Bello y Girardota se mostró que la amenaza sísmica en roca para estos no muestra variaciones considerables, lo que permite que el análisis de sensibilidad realizado se pueda enfocar en la influencia de la distribución espacial de los modelos. En cuanto a la exposición, los tres municipios presentan diferencias considerables, dada su extensión y su desarrollo en infraestructura. Medellín tiene una densidad poblacional y área construida alta, lo que se traduce en un valor expuesto mucho mayor al de los otros municipios; mientras Bello y Girardota, al ser más pequeños, tienen poblaciones y áreas construidas menores. Estas diferencias destacan cómo las características urbanas que influyen en la respuesta que tiene cada municipio frente a sismos.

En el análisis de sensibilidad se evaluaron seis distribuciones espaciales diferentes para el modelo de exposición, resultado de la agregación de la exposición en tres distribuciones geográficas (municipio, sector y sección) y tres tamaños de malla (cuadros con lado de 0.5 km, 0.75 km y 1 km). El análisis de la influencia de esta variable permitió identificar como la agregación del modelo de exposición influye en la precisión de las estimaciones de riesgo. Se destaca que, aunque las áreas de algunas de las mallas cuadradas son similares a las áreas promedio de las secciones y los sectores, las últimas tienen asociada una varianza alta en sus áreas, y por consiguiente hacen que haya una menor uniformidad en el modelo de exposición. En el análisis se encontró que las mallas con lados de 0.5 km, las cuales mantienen un área uniforme, permiten que la evaluación realizada sea más homogénea, haciendo que la evaluación del riesgo tenga en cuenta variaciones en las condiciones de sitio que la agregación a nivel de secciones no logra capturar, especialmente en municipios de menor tamaño como Girardota. A partir de los resultados se observó que, aunque la malla de lado de 1 km presenta errores de una magnitud comparable a los de las otras mallas, un menor tamaño de malla es preferible para reducir la incertidumbre asociada a la distribución espacial del modelo de exposición. Estos resultados obtenidos son consistentes con los obtenidos en [8], donde una mayor resolución del modelo de exposición logra los menores errores en las estimaciones de riesgo.

Se encontró que el método de selección de las propiedades del suelo influye considerablemente en los resultados del riesgo sísmico, incluso más que la agregación espacial del modelo de exposición. Al tener en cuenta las propiedades del suelo de una forma más detallada, como lo hace el método del vs30 diferenciado, se logran obtener resultados con estimaciones que tienen un nivel de precisión aceptable, incluso para aquellos análisis donde se tenían los modelos de exposición agregados a resoluciones bajas. A partir de los resultados se identifica que los errores son mayoritariamente positivos, lo que indica que

la sobreestimación es el error más predominante, especialmente en Medellín y Bello, donde se generan los mayores picos de error al usar un único valor de vs30 tomado del centroide de las unidades. De los resultados se observa que los errores se mantienen generalmente menores al cinco por ciento (son aceptables) para las corridas donde se tienen en cuenta todas las diferentes clases del suelo que hay en cada unidad (vs30 diferenciado), incluso cuando el modelo de exposición está agrupado a nivel de municipio. Se concluye que ignorar o simplificar excesivamente los efectos del suelo podría resultar en evaluaciones subestimadas o sobreestimadas de los riesgos.

A partir del análisis de sensibilidad realizado se logró identificar que la distribución espacial del modelo de exposición (y por lo tanto de la amenaza a través del modelo de suelo) tiene un impacto significativo en la evaluación del riesgo sísmico urbano, encontrando que mayores resoluciones permiten obtener estimaciones más precisas; no obstante, una mayor resolución en estos modelos implica un costo computacional mayor durante el análisis. Adicionalmente, se evidenció que la agregación espacial no solamente afecta las estimaciones absolutas, sino también la distribución y estabilidad de las mismas en la extensión de las zonas de estudio. Por lo anterior, es importante valorar el efecto de las agregaciones a partir de la consideración de diferentes métricas y no solamente a partir de la pérdida anual esperada (PAE). Es importante resaltar que la PAE es una estimación global que no permite ver el detalle de lo que ocurre al interior del lugar de análisis.

Al analizar el comportamiento espacial de los errores se observa que Girardota, dado su tamaño reducido, presentó las estimaciones con menor magnitud de errores, resaltando la influencia que tiene el tamaño del sitio de estudio en la precisión de los resultados. Los mapas de la distribución espacial del error señalan que la concentración de errores más altos se encuentra en la periferia de los municipios al hacer la agregación del modelo de exposición a nivel municipal y usando un único valor de vs30, mientras que en modelos más refinados con el vs30 diferenciado se logra una mejor distribución y menor magnitud de los errores en las estimaciones de las métricas de riesgo, siendo este efecto más predominante en los lugares de estudio con mayor área, como Medellín.

Al considerar las curvas de excedencia se observa que las diferencias más significativas con respecto a la corrida de referencia ocurren para periodos de retorno largos ( $\geq 475$  años). Este comportamiento es más evidente en las fatalidades y los edificios con daño completo, las cuales a partir de los resultados se evidencia que son métricas más sensibles a la agregación espacial del modelo de exposición y al método de selección de vs30. En periodos cortos ( $\leq 31$  años), se evidencia que, en municipios de menor área como Girardota, los resultados presentan errores considerables, sin embargo, en municipios de mayor área como Medellín se presentan errores aceptables para todos los métodos (a excepción de la agregación a nivel de municipio), lo que sugiere que para municipios de mayor área, la precisión del modelo es menos crítica en eventos más frecuentes y de menor magnitud, que son los que se generan en periodos de retorno corto.

En cuanto a las variables consideradas (pérdidas económicas, número de edificios con daño y número de fatalidades), se observa, en general, que las métricas relacionadas con daño completo y fatalidades presentan mayores errores que las pérdidas totales. Estas diferencias se deben a que las pérdidas económicas están relacionadas con curvas de vulnerabilidad, mientras que el daño y las afectaciones

humanas están relacionadas con curvas de fragilidad. Los resultados sugieren una mayor sensibilidad al modelo de fragilidad que al de vulnerabilidad considerados para la evaluación del riesgo.

Para lograr determinar la resolución mínima más adecuada para usarse en el análisis sin comprometer la precisión de las estimaciones (objetivo del presente trabajo) se debe tener en cuenta el tamaño y la configuración urbana de los municipios o el lugar que se esté estudiando. De forma general se debería tener prevalencia sobre un modelo de condiciones del suelo más detallado antes que una mayor resolución en el modelo de exposición, ya que este logra dar estimaciones precisas incluso cuando se usan modelos de exposición con muy poca resolución. Ahora bien, en términos de exposición, en lugares de mayor extensión y complejidad urbana como Medellín y Bello se determinó que requieren de una agregación intermedia de los modelos, ya que esta permite capturar la variabilidad espacial que hay en el territorio. Por otro lado, en el caso de municipios pequeños como Girardota, no se identifica una sensibilidad alta a la variabilidad espacial dada la homogeneidad relativa que tiene el territorio y a su reducida extensión.

Evaluar las pérdidas estimadas de forma absoluta no son una medida comparativa válida, ya que no capturan la dispersión para diferentes periodos de retorno. Al analizar las curvas de excedencia de pérdida se evidencia que la sensibilidad de las estimaciones a la agregación del modelo de exposición y al método de selección de vs30 varía según la métrica evaluada y el periodo de retorno. Para el caso de los edificios con daño completo y fatalidades se muestra una mayor sensibilidad a la agregación espacial, mostrando errores considerablemente mayores especialmente en periodos de retorno mayores, es decir, para eventos de mayor magnitud y menor frecuencia; por otro lado, en pérdidas económicas se evidencia mayor uniformidad en periodos de retorno mayores para los diferentes niveles de agregación (a excepción de la agregación a nivel de municipio), especialmente en municipios de mayor extensión como Medellín.

En los últimos años, el crecimiento de las capacidades computacionales viene acompañado de un aumento en la complejidad de los modelos y el interés en abordar nuevas incertidumbres dentro de la evaluación del riesgo sísmico urbano. Dado lo anterior, variaciones como la agregación del modelo de exposición se vuelve indispensable al permitir una reducción significativa de los recursos computacionales, sin afectar en gran magnitud la precisión en las estimaciones. Los métodos y los análisis expuestos en este trabajo le ofrecen una guía práctica a los modeladores de riesgo sísmico que buscan un balance entre precisión y eficiencia para sus modelos.

Si bien los resultados presentados se enfocan en tres municipios particulares, la selección de estos municipios considerando diferentes tamaños y población permite abarcar una gama interesante de características que pueden coincidir con las características de una gran variedad de centros urbanos. Aunque los resultados deben ser mirados con cuidado para otros lugares, generalidades como enfocar los esfuerzos en el modelo de suelo y considerar una distribución del modelo de agregación lo más homogénea posible pueden aplicarse en otros lugares. Se sugiere realizar análisis de sensibilidad como los presentados en este trabajo para centros urbanos con condiciones diferentes de amenaza en roca, distribución de tipo de suelo y de las características de los elementos expuestos, entre otras. Estos análisis complementarían los resultados del presente trabajo y permitirían obtener lineamientos más robustos que facilitarían la evaluación del riesgo sísmico en entornos urbanos.

## REFERENCIAS

- [1] H. Crowley, P. Stafford, y J. Bommer, «Can Earthquake Loss Models be Validated Using Field Observations?», *J. Earthquake Eng.*, vol. 12, abr. 2008, doi: 10.1080/13632460802212923.
- [2] J. J. Bommer y H. Crowley, «The influence of ground-motion variability in earthquake loss modelling», *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 4, n.º 3, pp. 231-248, ago. 2006, doi: 10.1007/S10518-006-9008-Z/METRICS.
- [3] H. Crowley, J. J. Bommer, R. Pinho, y J. Bird, «The impact of epistemic uncertainty on an earthquake loss model», *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 34, n.º 14, pp. 1653-1685, 2005, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.498>.
- [4] I. E. Bal, J. J. Bommer, P. J. Stafford, H. Crowley, y R. Pinho, «The influence of geographical resolution of urban exposure data in an earthquake loss model for Istanbul», *Earthquake Spectra*, vol. 26, n.º 3, pp. 619-634, ago. 2010, doi: 10.1193/1.3459127.
- [5] C. Scheingraber y M. Käser, «Spatial seismic hazard variation and adaptive sampling of portfolio location uncertainty in probabilistic seismic risk analysis», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 20, n.º 7, pp. 1903-1918, jul. 2020, doi: 10.5194/nhess-20-1903-2020.
- [6] C. Scheingraber y M. A. Käser, «The Impact of Portfolio Location Uncertainty on Probabilistic Seismic Risk Analysis», *Risk Anal.*, vol. 39, n.º 3, pp. 695-712, mar. 2019, doi: 10.1111/risa.13176.
- [7] J. Dabbeek, H. Crowley, V. Silva, G. Weatherill, N. Paul, y C. I. Nievas, «Impact of exposure spatial resolution on seismic loss estimates in regional portfolios», *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 19, n.º 14, pp. 5819-5841, nov. 2021, doi: 10.1007/S10518-021-01194-X/TABLES/3.
- [8] A. Papadopoulos, P. Roth, y L. Danciu, *Exposure manipulation strategies for balancing computational efficiency and precision in seismic risk analysis*. 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-3969041/v1.
- [9] M. M. Arcila Rivera *et al.*, *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*, vol. 43. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2020. doi: 10.32685/9789585279469.
- [10] J. Eraso y J. Montejo, *Cálculo del promedio de velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad (Vs30) en Colombia como una aproximación a la estimación de los efectos sísmicos de sitio a escala nacional*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano SGC, 2015.
- [11] D. J. Wald y T. I. Allen, «Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification», *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 97, n.º 5, pp. 1379-1395, oct. 2007, doi: 10.1785/0120060267.

- [12] J. J. Bommer, «Earthquake hazard and risk analysis for natural and induced seismicity: towards objective assessments in the face of uncertainty», *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 20, n.º 6, pp. 2825-3069, 2022, doi: 10.1007/s10518-022-01357-4.
- [13] C. Yepes-Estrada *et al.*, «Global building exposure model for earthquake risk assessment», <https://doi.org/10.1177/87552930231194048>, vol. 39, n.º 4, pp. 2212-2235, sep. 2023, doi: 10.1177/87552930231194048.
- [14] R. Fayjaloun, C. Negulescu, A. Roullé, S. Auclair, P. Gehl, y M. Faravelli, «Sensitivity of Earthquake Damage Estimation to the Input Data (Soil Characterization Maps and Building Exposure): Case Study in the Luchon Valley, France», *Geosciences 2021, Vol. 11, Page 249*, vol. 11, n.º 6, p. 249, jun. 2021, doi: 10.3390/GEOSCIENCES11060249.
- [15] H. K. Mistry y D. Lombardi, «A stochastic exposure model for seismic risk assessment and pricing of catastrophe bonds», *Nat. Hazard.*, vol. 117, n.º 1, pp. 803-829, may 2023, doi: 10.1007/S11069-023-05884-4/TABLES/4.
- [16] J. Rudden, «Most costly earthquakes to the insurance industry | Statista». Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/267175/insured-losses-caused-by-the-most-costly-earthquakes-since-1980/>
- [17] M. Mavrouli, S. Mavroulis, E. Lekkas, y A. Tsakris, «The Impact of Earthquakes on Public Health: A Narrative Review of Infectious Diseases in the Post-Disaster Period Aiming to Disaster Risk Reduction», *Microorg.*, vol. 11, n.º 2, feb. 2023, doi: 10.3390/MICROORGANISMS11020419.
- [18] CRED y UNDRR, *Human cost of disasters: An overview of the last 20 years, 2000-2019*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020.
- [19] FAO, *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2009.
- [20] AIS, *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica Comité AIS-300, 2009.
- [21] C. y T. (MAVDT) Ministerio de Vivienda, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010.
- [22] A. B. Acevedo *et al.*, «Seismic risk assessment for the residential buildings of the major three cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali», *Earthquake Spectra*, vol. 36, n.º 1\_suppl, pp. 298-320, oct. 2020, doi: 10.1177/8755293020942537.
- [23] A. B. Acevedo, J. D. Jaramillo, C. Yepes, V. Silva, F. A. Osorio, y M. Villar, «Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia», *Nat. Hazard.*, vol. 86, pp. 31 – 54, 2017, doi: 10.1007/s11069-016-2647-8.

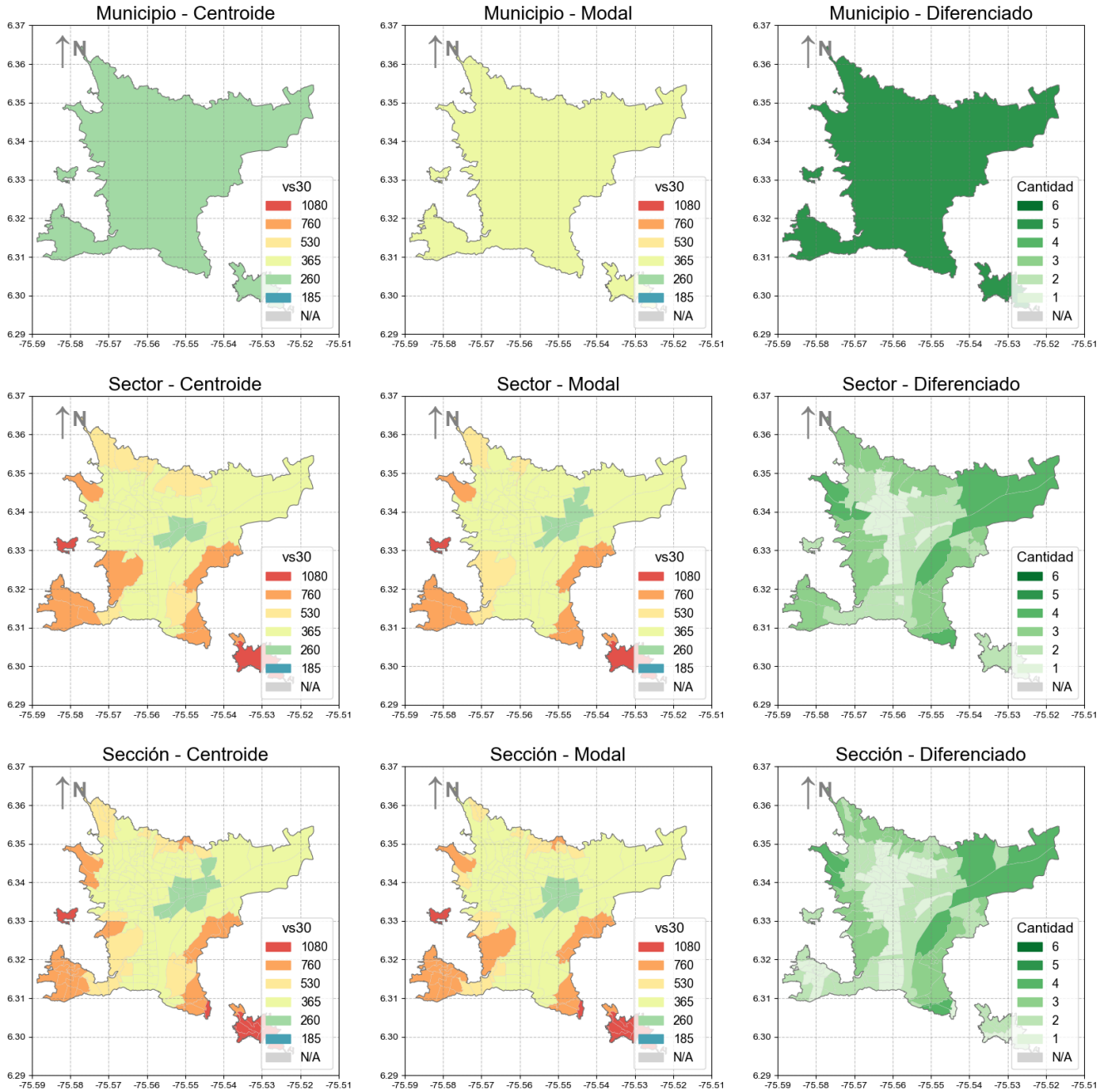
- [24] K. Pitilakis, E. Riga, y S. Apostolaki, «How Important is Site Conditions Detailing and Vulnerability Modeling in Seismic Hazard and Risk Assessment at Urban Scale?», en *Geotech. geol. earthq. eng.*, vol. 52, Springer Science and Business Media B.V., 2022, pp. 140 – 161. doi: 10.1007/978-3-031-11898-2\_8.
- [25] P. Kalakonas, V. Silva, A. Mouyiannou, y A. Rao, «Exploring the impact of epistemic uncertainty on a regional probabilistic seismic risk assessment model», *Nat. Hazard.*, vol. 104, n.º 1, pp. 997-1020, 2020, doi: 10.1007/s11069-020-04201-7.
- [26] A. Fuenzalida, A. Taboada, y C. Dimaté, «Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción», *Física de la tierra, ISSN 0214-4557, N° 10, 1998 (Ejemplar dedicado a: Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica)*, págs. 111-148, n.º 10, pp. 111-148, 1998, Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=124572>
- [27] C. Hawkesworth, P. A. Cawood, B. Dhuime, y T. Kemp, «Tectonic processes and the evolution of the continental crust», *J Geol Soc London*, vol. 181, n.º 4, pp. jgs2024-027, jul. 2024, doi: 10.1144/JGS2024-027.
- [28] C. Liu *et al.*, «The present-day stress field along the Northwest Pacific Wadati-Benioff zone constrained by focal mechanisms of moderate earthquakes», *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 10, ene. 2023, doi: 10.3389/FEART.2022.1017632.
- [29] G. A. Prieto, G. C. Beroza, S. A. Barrett, G. A. López, y M. Florez, «Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics», *Tectonophysics*, vol. 570-571, pp. 42-56, oct. 2012, doi: 10.1016/J.TECTO.2012.07.019.
- [30] A. C. Riaño, J. C. Reyes, L. E. Yamín, J. Bielak, R. Taborda, y D. Restrepo, «Integration of 3D large-scale earthquake simulations into the assessment of the seismic risk of Bogota, Colombia», *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 50, n.º 1, pp. 155-176, 2021, doi: 10.1002/eqe.3373.
- [31] M. A. Salgado-Gálvez, D. Zuloaga Romero, C. A. Velásquez, M. L. Carreño, O. D. Cardona, y A. H. Barbat, «Urban seismic risk index for Medellín, Colombia, based on probabilistic loss and casualties estimations.», *Nat. Hazard.*, vol. 80, n.º 3, pp. 1995-2021, feb. 2016, doi: 10.1007/S11069-015-2056-4.
- [32] L. Cano Saldaña, D. A. Henao Ochoa, N. Mejía Martínez, G. M. Molina Vinasco, y J. D. Orrego Damelínes, «Determinación de los espectros de respuesta sísmica para los suelos de la ciudad de Pereira utilizando análisis unidimensionales», 23 de abril de 2015. Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/7881>

- [33] M. A. Salgado-Gálvez, G. A. Bernal, D. Zuloaga, M. C. Marulanda, O. D. Cardona, y S. Henao, «Probabilistic Seismic Risk Assessment in Manizales, Colombia: Quantifying Losses for Insurance Purposes», *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 8, n.º 3, pp. 296-307, sep. 2017, doi: 10.1007/S13753-017-0137-6/TABLES/3.
- [34] E. E. Rodríguez Granados, C. J. Sainea Vargas, y M. Á. Sánchez Salinas, «Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja», abr. 2015. Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/7869>
- [35] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «MANUAL DE USO DEL MARCO GEOESTADÍSTICO NACIONAL EN EL PROCESO ESTADÍSTICO V. 3.0», abril de 2024, *DIRECCIÓN DE REGULACIÓN, PLANEACIÓN, ESTANDARIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN -DIRPEN*.
- [36] J. Baker, B. Bradley, y P. Stafford, «Seismic Hazard and Risk Analysis», *Seismic Hazard and Risk Analysis*, oct. 2021, doi: 10.1017/9781108425056.
- [37] H. Pérez *et al.*, «Reporte MNRS 005-2023: Acuerdos metodológicos para la evaluación del riesgo sísmico en centros poblados», *Bogotá: Servicio Geológico Colombiano*, 2023.
- [38] I. M. Idrissa, «An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes», <https://doi.org/10.1193/070613EQS195M>, vol. 30, n.º 3, pp. 1155-1177, ago. 2014, doi: 10.1193/070613EQS195M.
- [39] C. Cauzzi, E. Faccioli, M. Vanini, y A. Bianchini, «Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records», *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 13, n.º 6, pp. 1587-1612, jun. 2015, doi: 10.1007/S10518-014-9685-Y/METRICS.
- [40] N. A. Abrahamson, W. J. Silva, y R. Kamai, «Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions», *Earthquake Spectra*, vol. 30, n.º 3, pp. 1025-1055, ago. 2014, doi: 10.1193/070913EQS198M/SUPPL\_FILE/ASK14\_COEFFS.XLS.
- [41] N. Abrahamson, N. Gregor, y K. Addo, «BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes», <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>, vol. 32, n.º 1, pp. 23-44, feb. 2016, doi: 10.1193/051712EQS188MR.
- [42] J. X. Zhao *et al.*, «Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period», *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 96, n.º 3, pp. 898-913, jun. 2006, doi: 10.1785/0120050122.

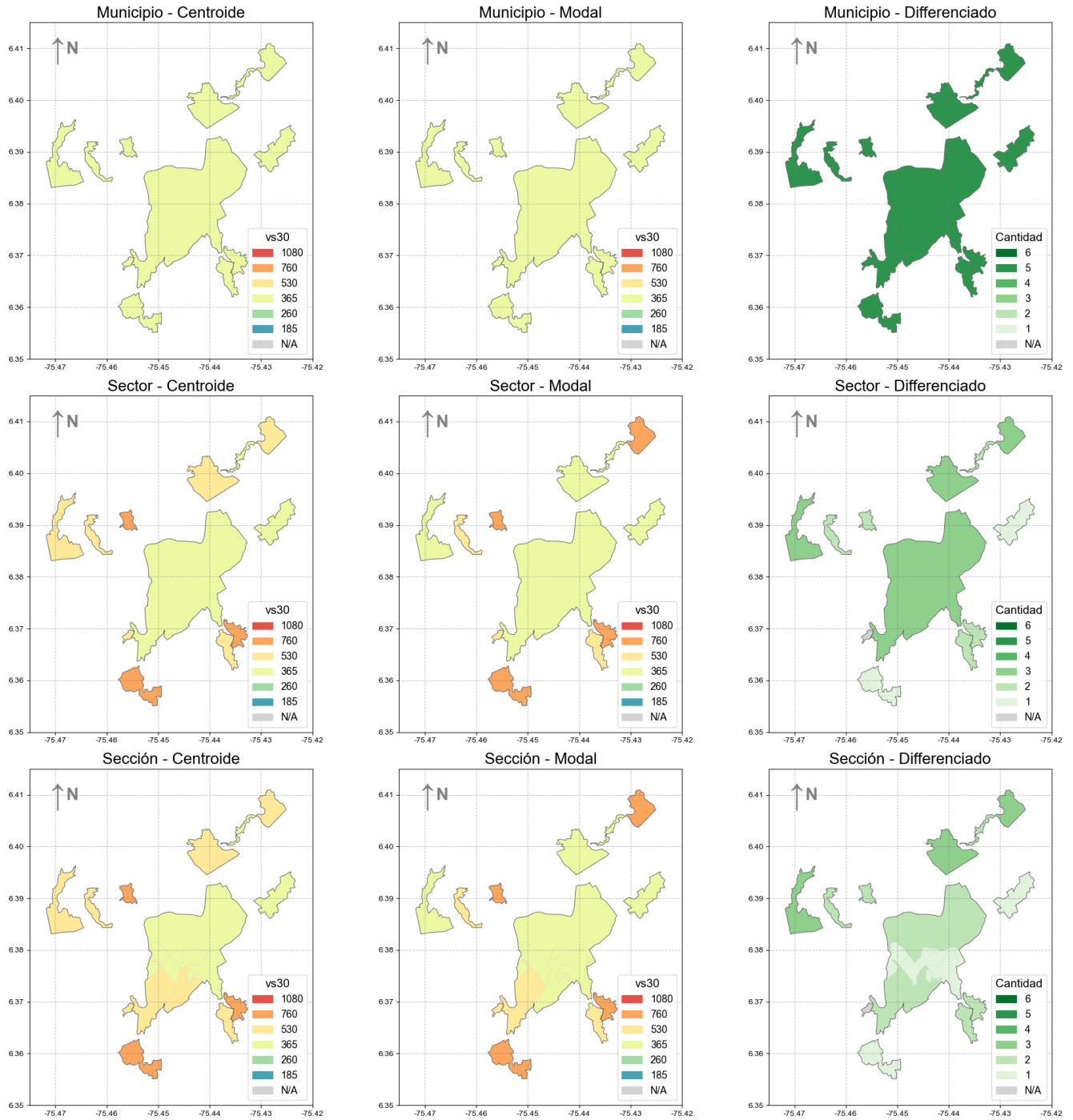
- [43] G. A. Montalva, N. Bastías, y A. Rodríguez-Marek, «Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone», *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 107, n.º 2, pp. 901-911, abr. 2017, doi: 10.1785/0120160221.
- [44] J. Reyes, J. Echeverry, J. Daza, A. Clavijo, J. Del Río, y J. Hurtado, «Modelo de exposición del municipio de Girardota. MNRS – Modelo Nacional de Riesgo Sísmico Reporte MNRS Municipios Fase II-2022», 2022.
- [45] J. Reyes, J. Echeverry, J. Daza, A. Clavijo, J. Del Río, y J. Hurtado, «Modelo de exposición del municipio de Bello. MNRS – Modelo Nacional de Riesgo Sísmico Reporte MNRS Municipios Fase II-2022», 2022.
- [46] J. Reyes, J. Echeverry, J. Daza, A. Clavijo, J. Del Río, y J. Hurtado, *Modelo de exposición del municipio de Medellín. MNRS – Modelo Nacional de Riesgo Sísmico*. Bogotá: ACOFI, Universidad de los Andes, 2022.
- [47] J. Reyes, J. Echeverry, J. Daza, A. Clavijo, J. Del Río, y J. Hurtado, «Modelo de Fragilidad/Vulnerabilidad. MNRS – Modelo Nacional de Riesgo Sísmico Reporte MNRS Municipios Fase II-2022», 2022.
- [48] P. Anbazhagan, K. Bajaj, K. Matharu, S. S. R. Moustafa, y N. S. N. Al-Arifi, «Probabilistic seismic hazard analysis using the logic tree approach – Patna district (India)», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 19, n.º 10, pp. 2097-2115, 2019, doi: 10.5194/nhess-19-2097-2019.
- [49] A. B. Acevedo Jaramillo, S. Carrascal Díaz, y D. González González, «Resultados de la evaluación del riesgo sísmico para la cabecera municipal de Apartadó (Antioquia)», 2023.
- [50] L. Raganelli, «From the risk integral to seismic PSA models. Practice and limitation of seismic risk assessment», en *Energy Procedia*, 2017, pp. 154-162. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.104.
- [51] V. Silva, «Critical Issues on Probabilistic Earthquake Loss Assessment», *J. Earthquake Eng.*, vol. 22, n.º 9, pp. 1683-1709, 2018, doi: 10.1080/13632469.2017.1297264.
- [52] H. Crowley, «Earthquake Risk Assessment: Present Shortcomings and Future Directions», *Geotech. geol. earthq. eng.*, vol. 34, pp. 515-532, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-07118-3\_16.
- [53] G. A. Weatherill, V. Silva, H. Crowley, y P. Bazzurro, «Exploring the impact of spatial correlations and uncertainties for portfolio analysis in probabilistic seismic loss estimation», *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 13, n.º 4, pp. 957-981, abr. 2015, doi: 10.1007/S10518-015-9730-5/METRICS.
- [54] P. Bazzurro y J. Park, «The effects of portfolio manipulation on earthquake portfolio loss estimates», ene. 2007.

# ANEXOS

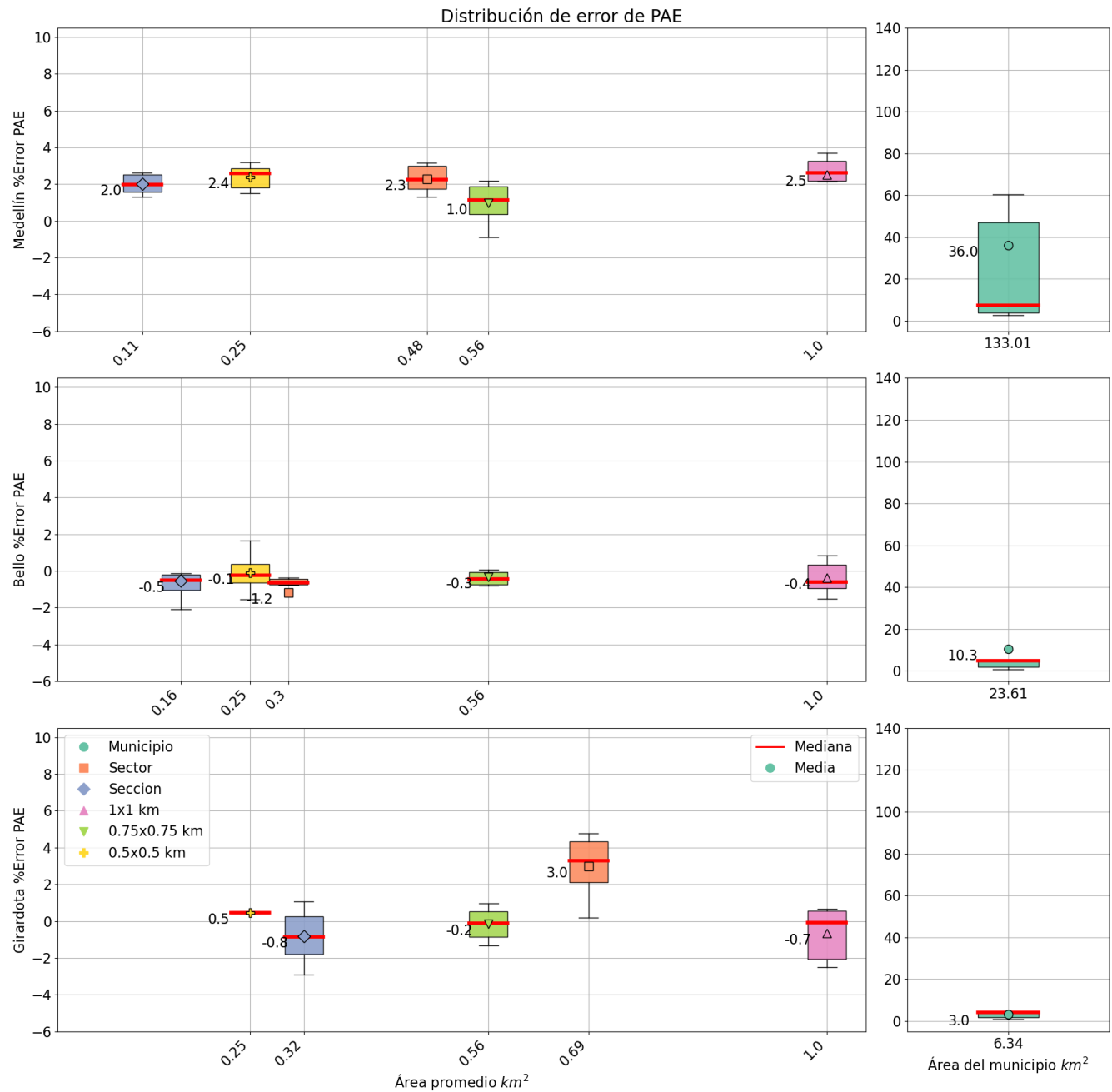
Anexo A. Mapa de vs30 con los diferentes métodos para Bello (elaboración propia).



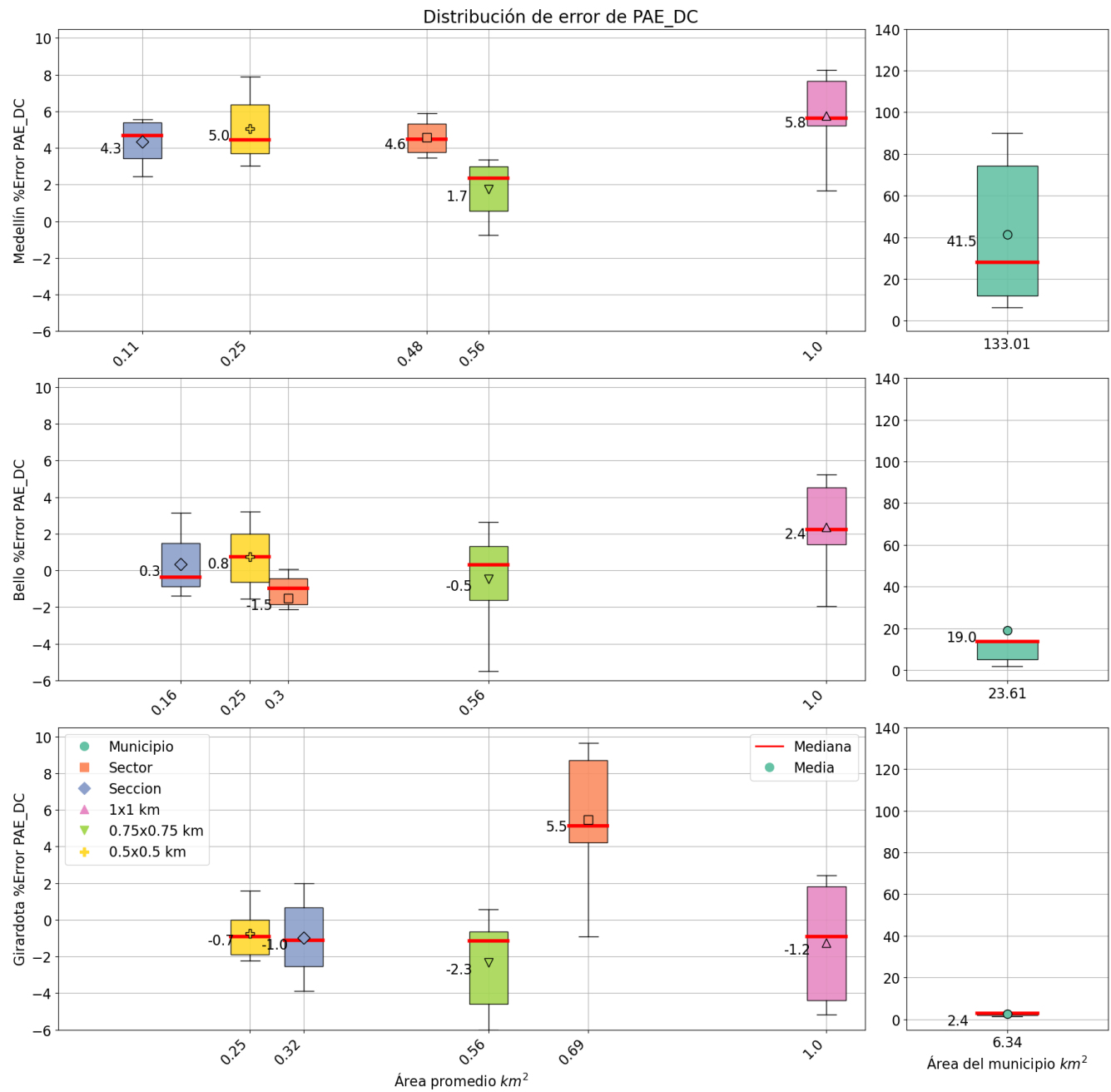
Anexo B. Mapa de vs30 con los diferentes métodos para Girardota (elaboración propia).



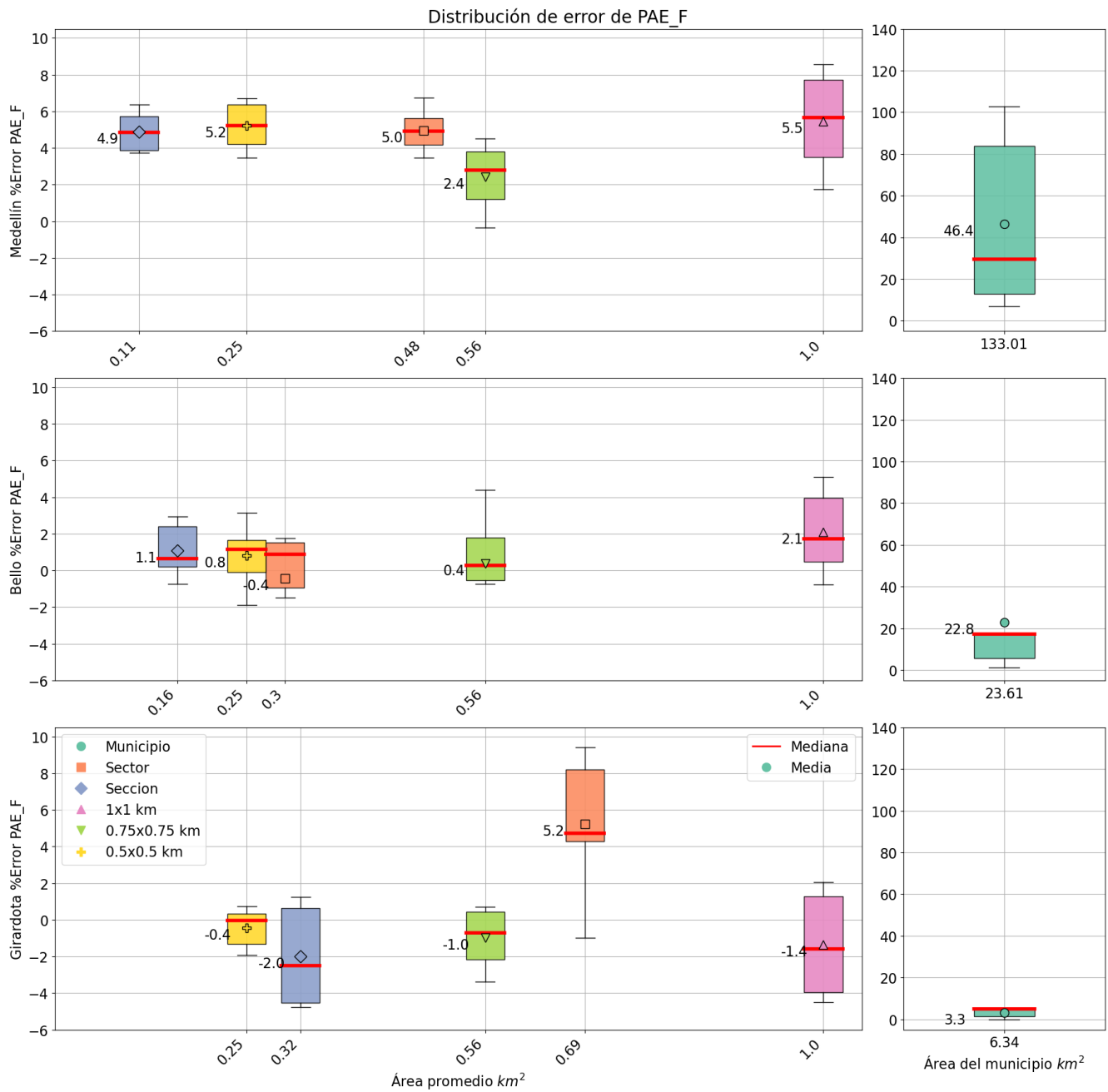
Anexo C. Errores relativos de PAE asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia).



Anexo D. Errores relativos de PAE\_DC asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia).

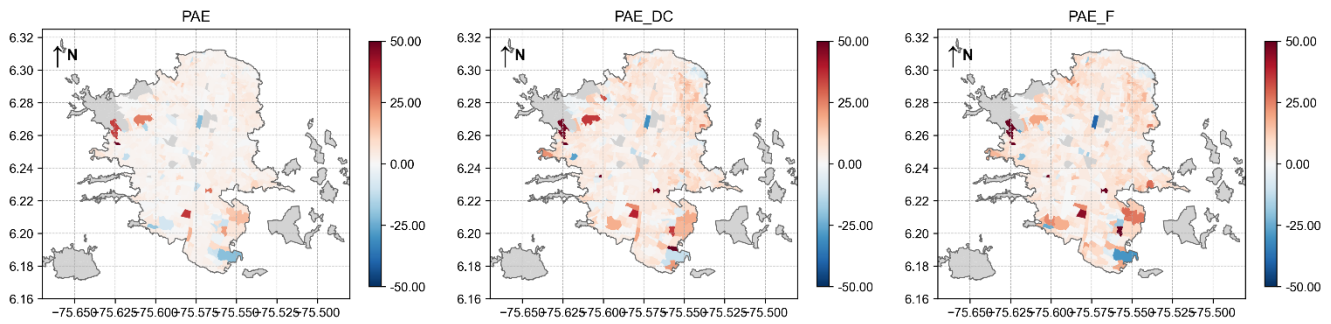


Anexo E. Errores relativos de PAE\_F asociados al área promedio de las unidades de agregación del modelo de exposición (elaboración propia).

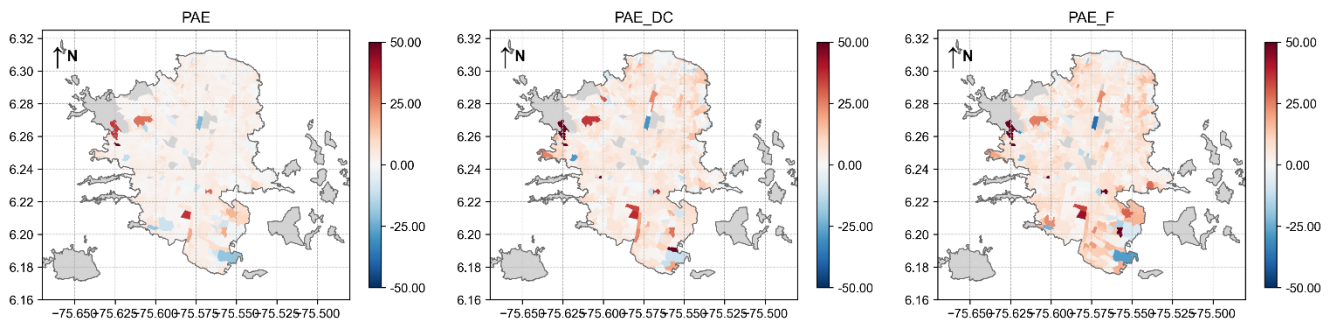


# Anexo F. Mapas de error para Medellín con vs30 diferenciado (elaboración propia).

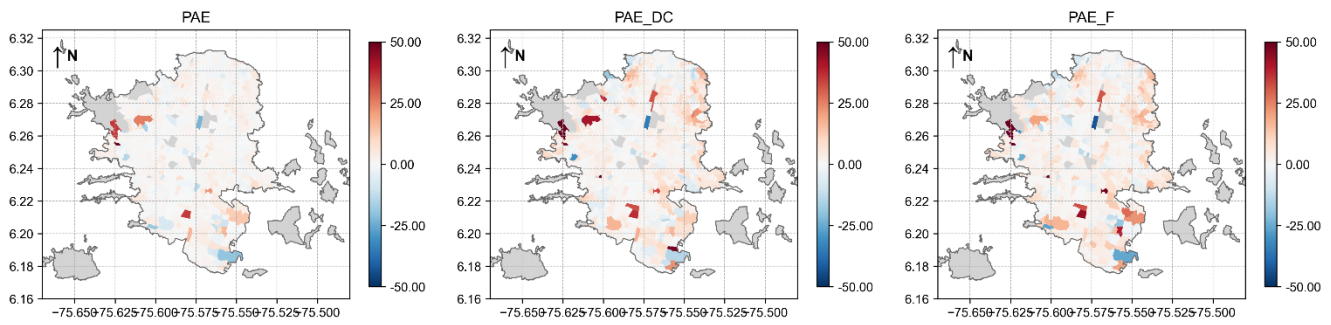
VS30 diferenciado y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



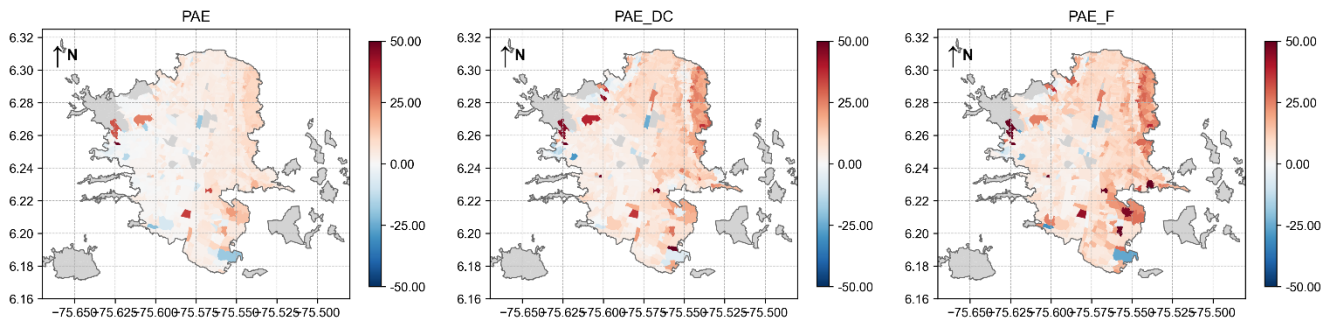
VS30 diferenciado y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



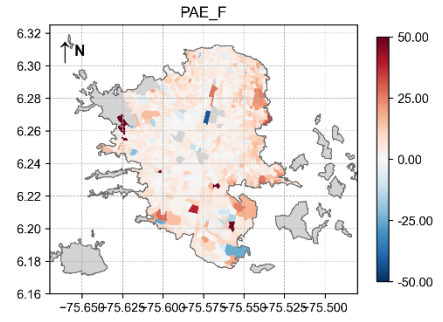
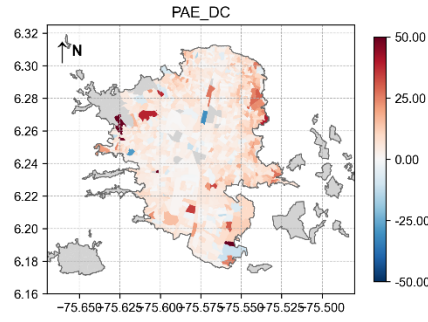
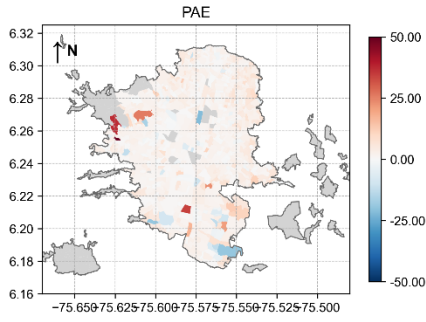
VS30 diferenciado y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



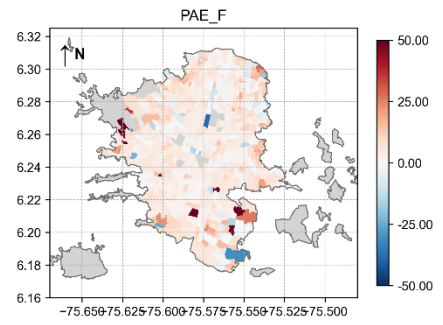
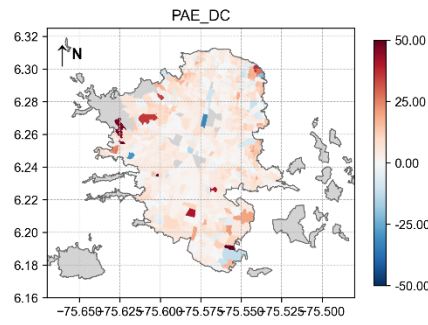
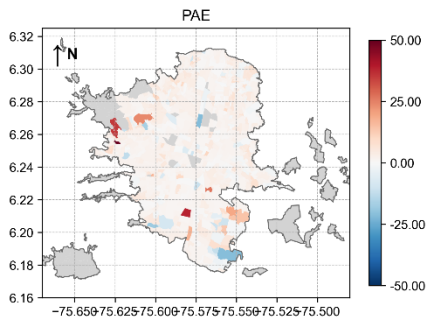
VS30 diferenciado y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 diferenciado y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

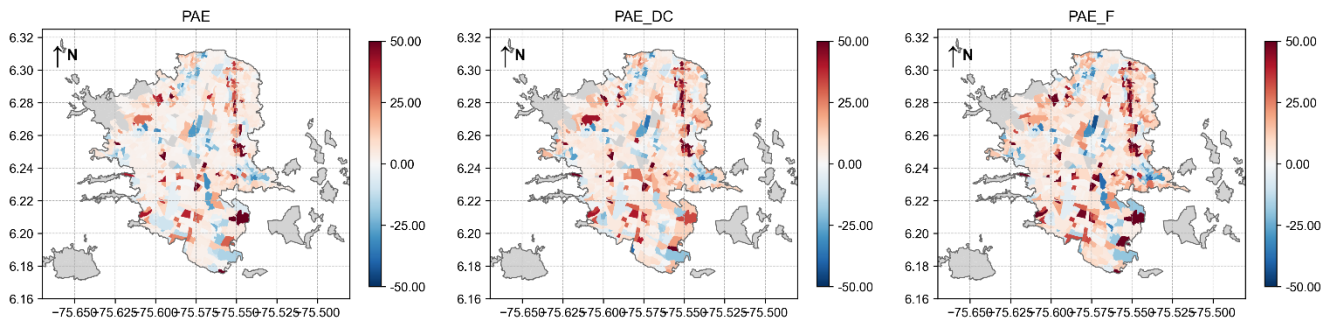


VS30 diferenciado y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide

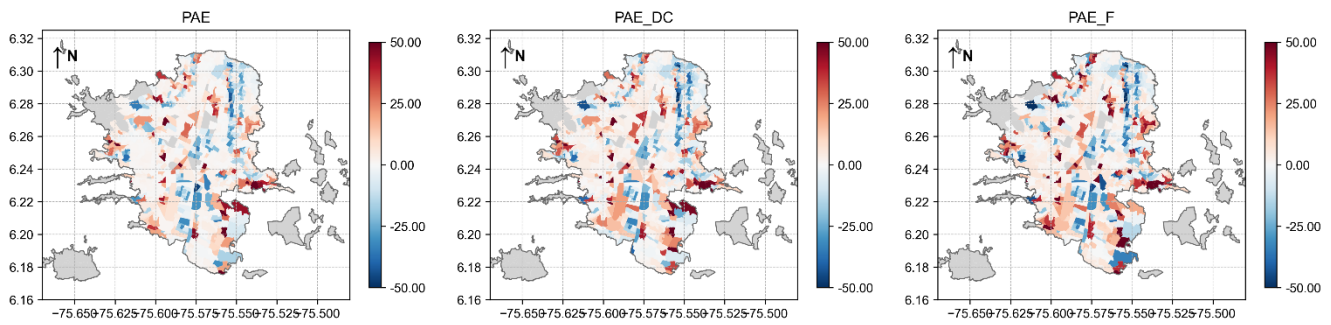


Anexo G. Mapas de error para Medellín con vs30 en centroide (elaboración propia).

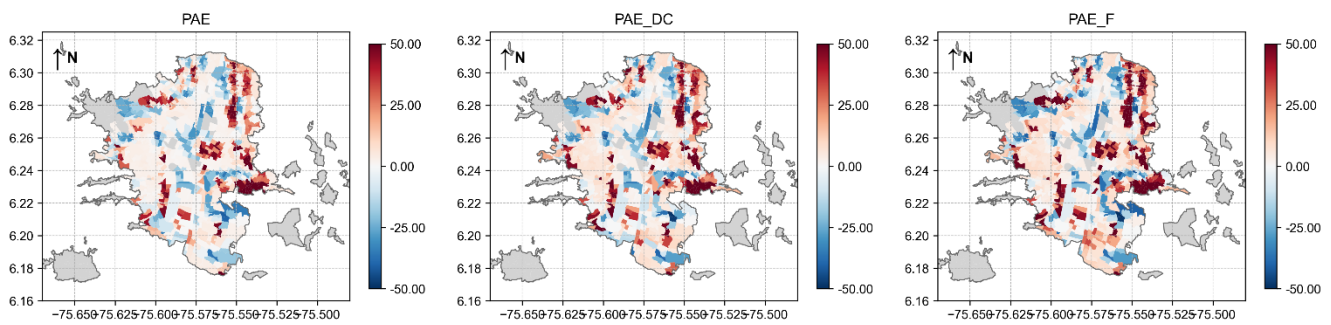
VS30 en centroide y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



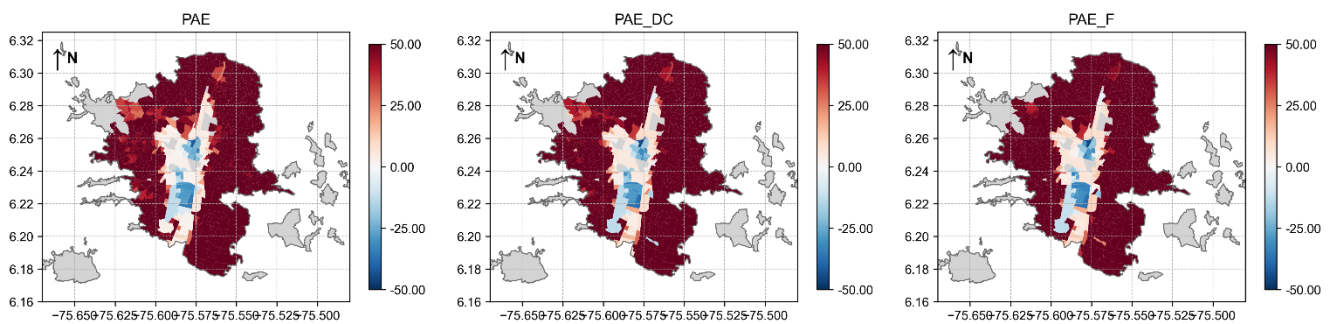
VS30 en centroide y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



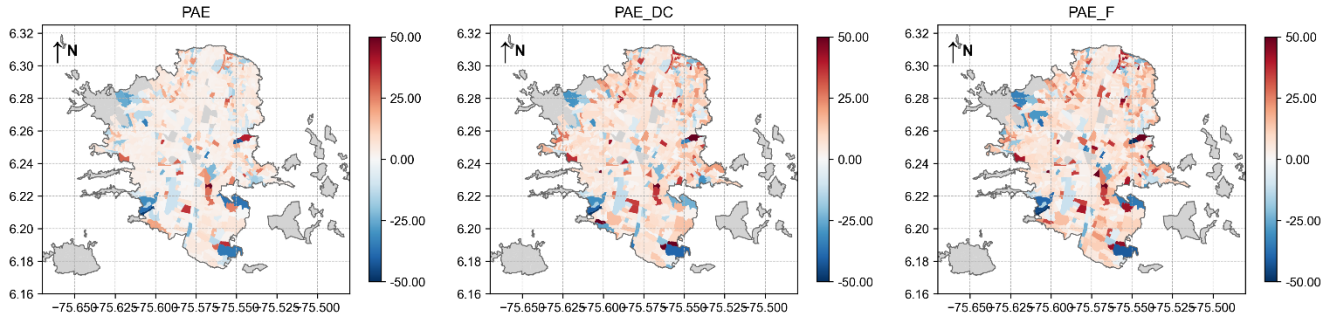
VS30 en centroide y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



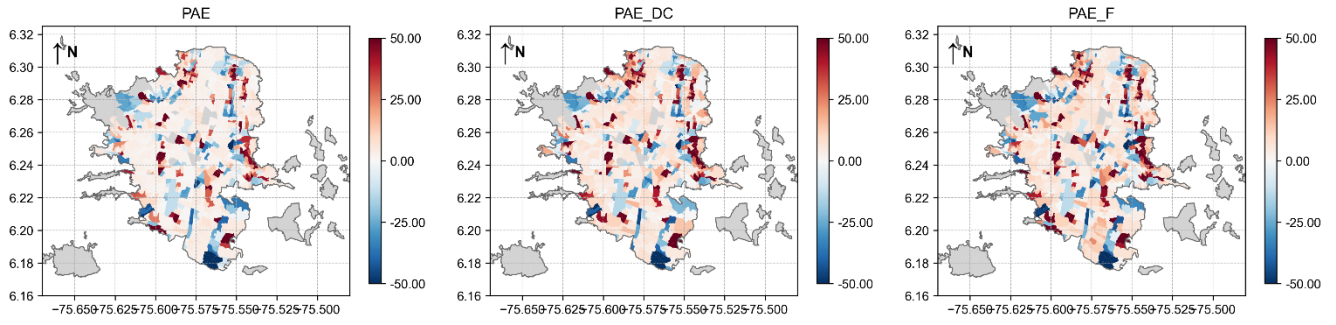
VS30 en centroide y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



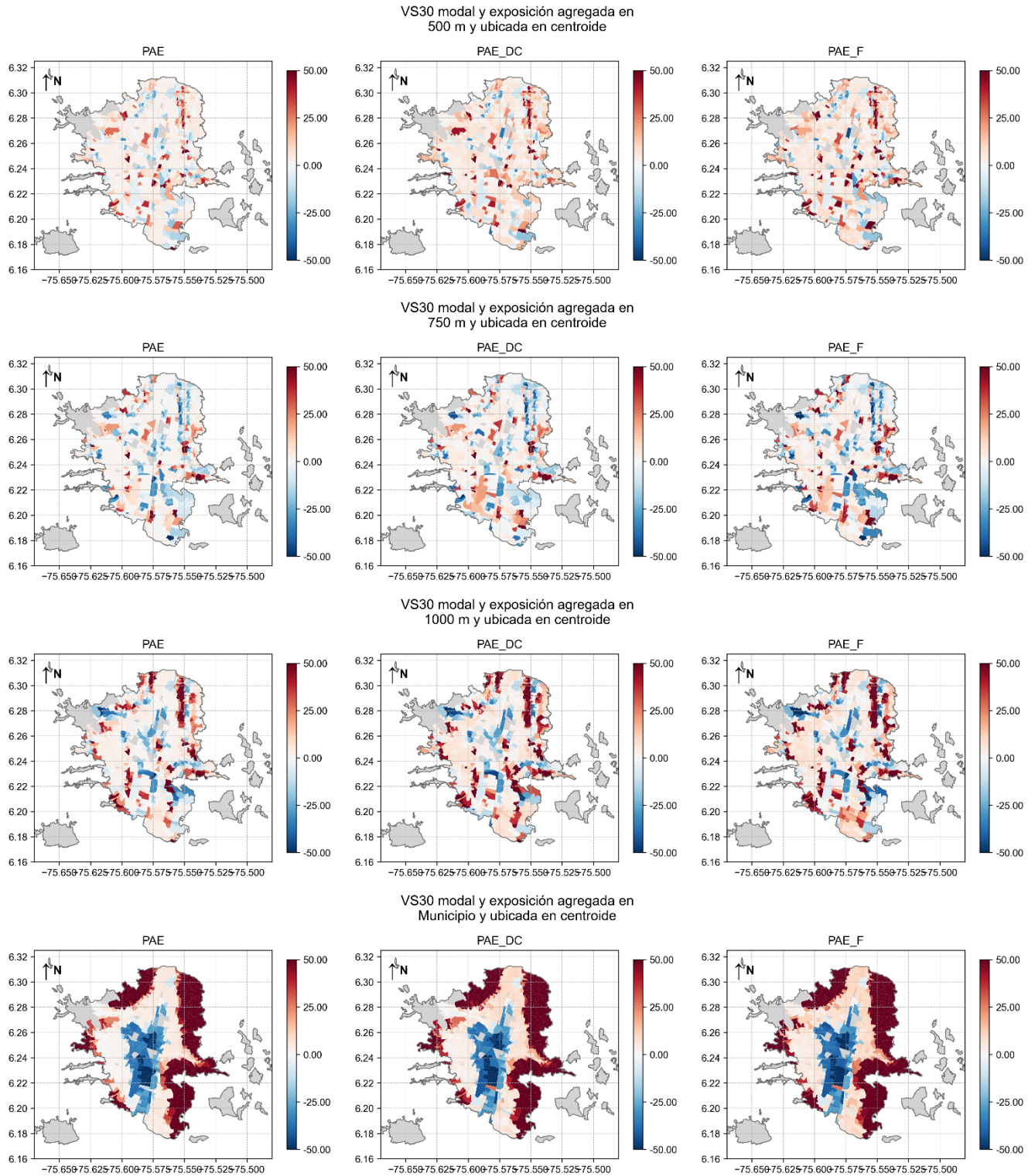
VS30 en centroide y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide



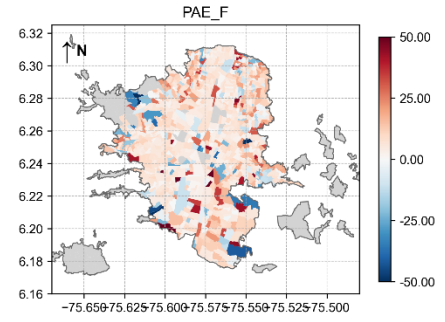
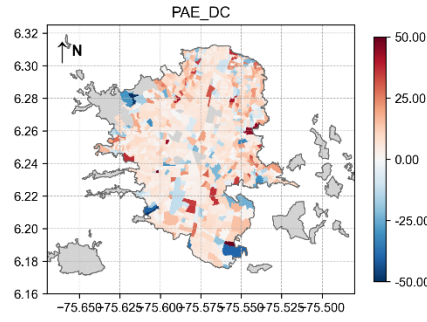
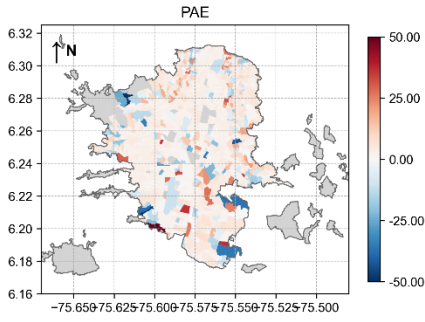
VS30 en centroide y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide



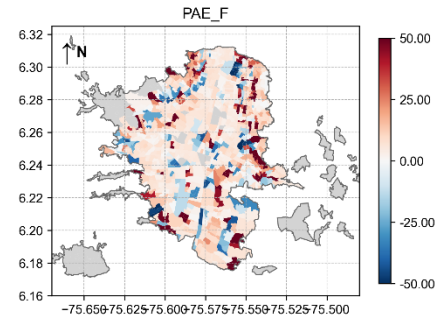
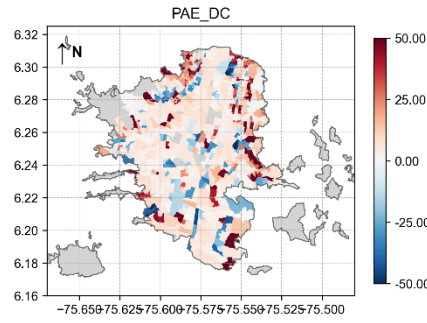
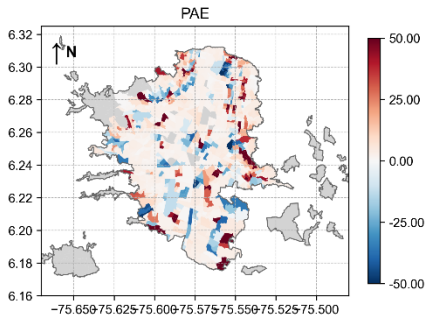
# Anexo H. Mapas de error para Medellín con vs30 modal (elaboración propia).



VS30 modal y exposición agregada en  
Sección y ubicada en centroide

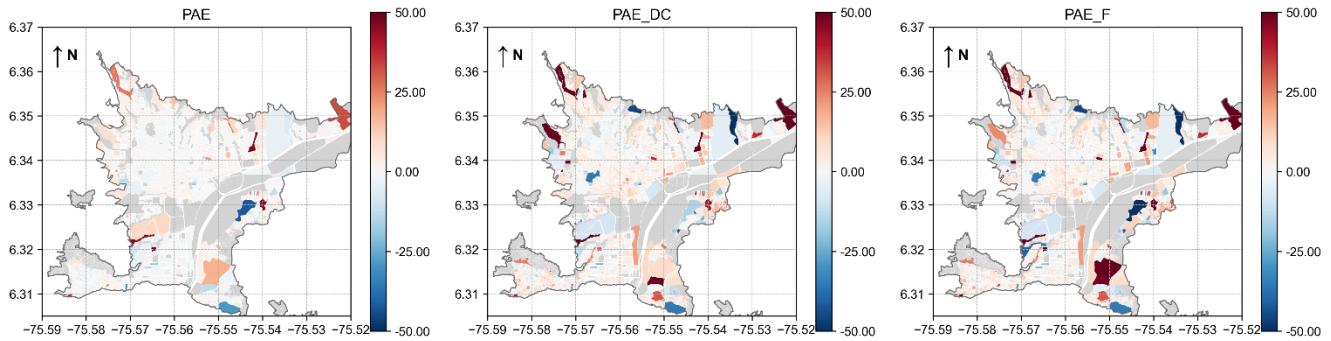


VS30 modal y exposición agregada en  
Sector y ubicada en centroide

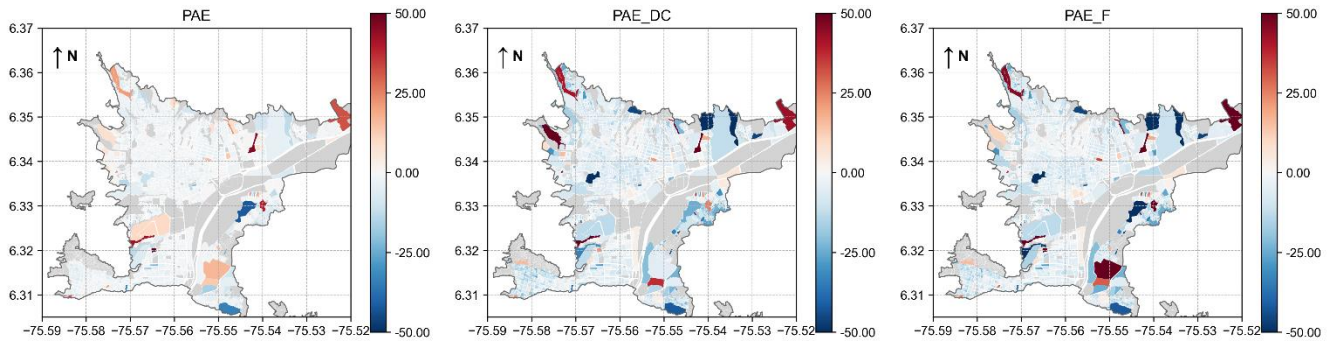


# Anexo I. Mapas de error para Bello con vs30 diferenciado (elaboración propia).

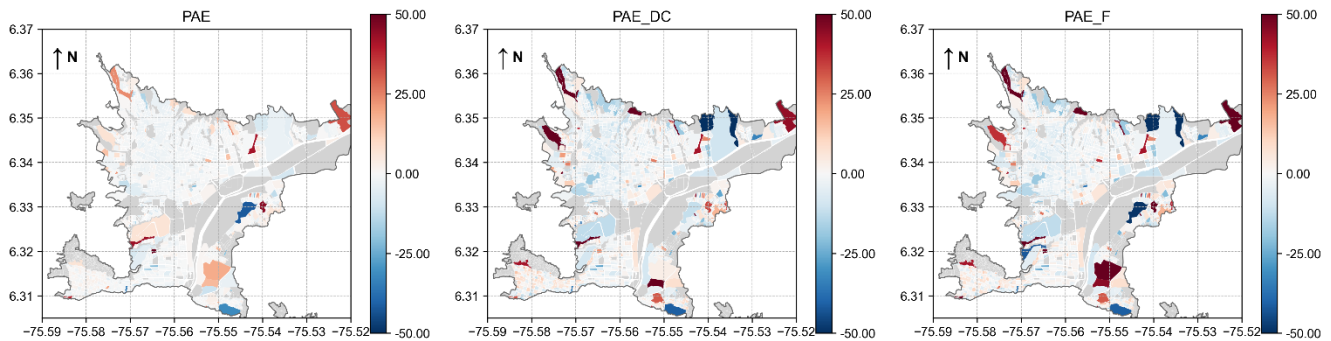
VS30 diferenciado y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



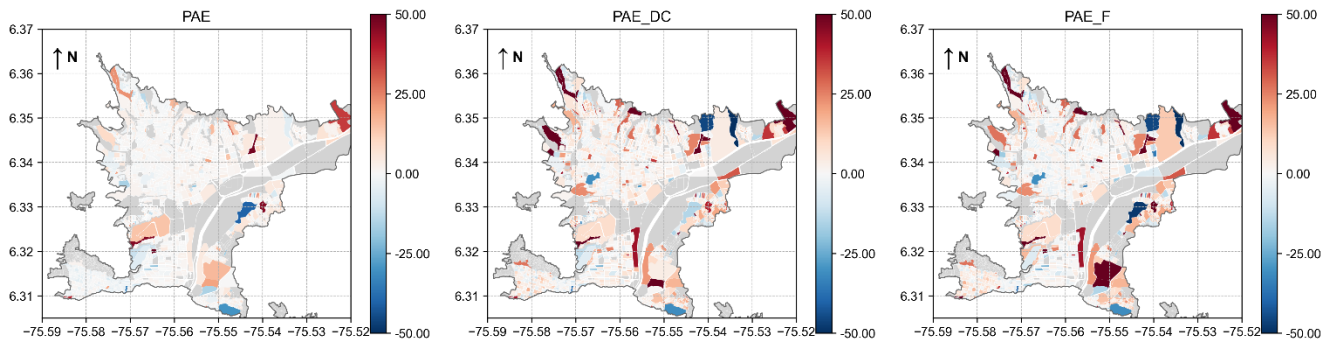
VS30 diferenciado y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



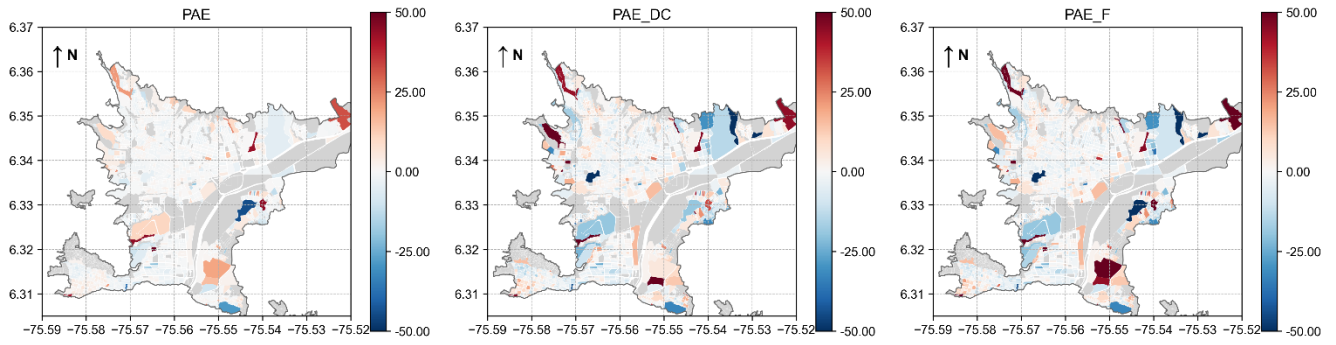
VS30 diferenciado y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



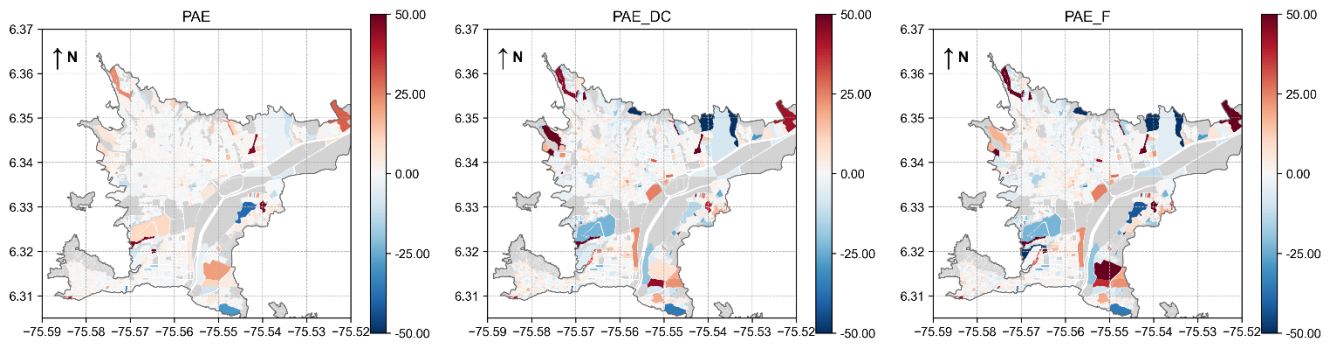
VS30 diferenciado y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 diferenciado y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

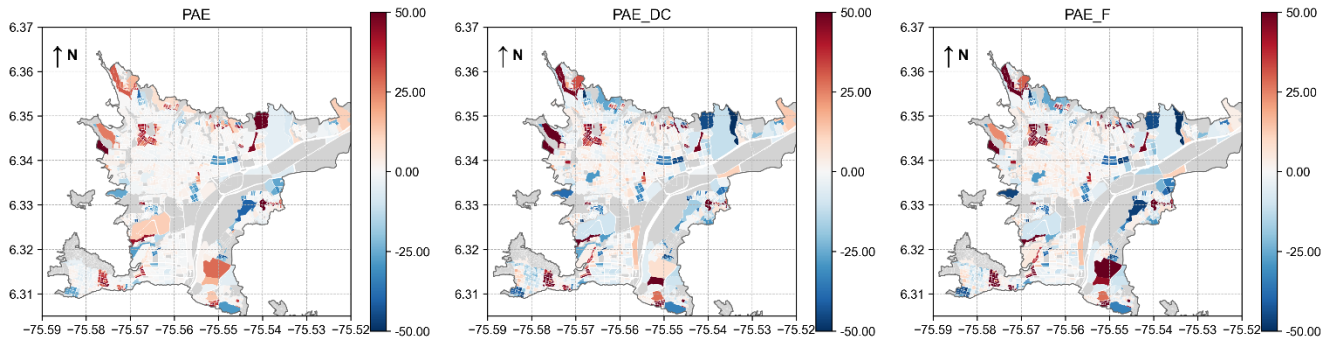


VS30 diferenciado y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide

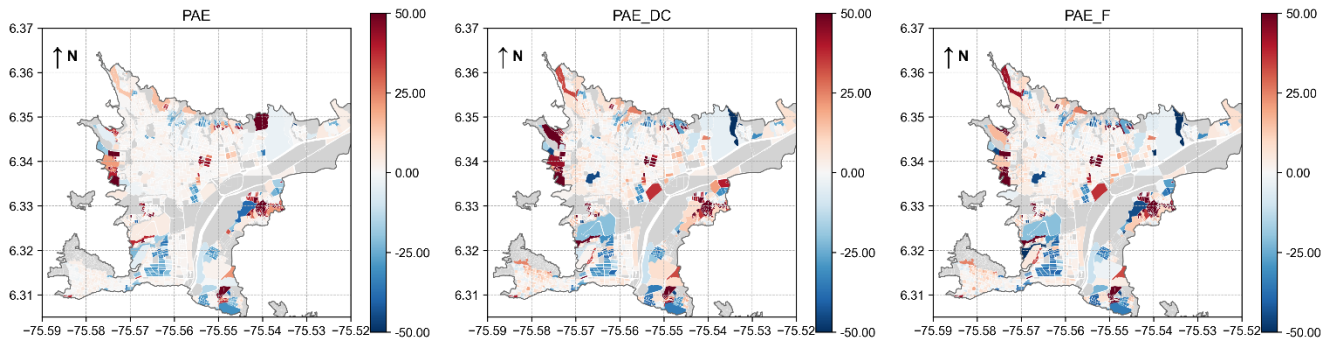


# Anexo J. Mapas de error para Bello con vs30 en centroide (elaboración propia).

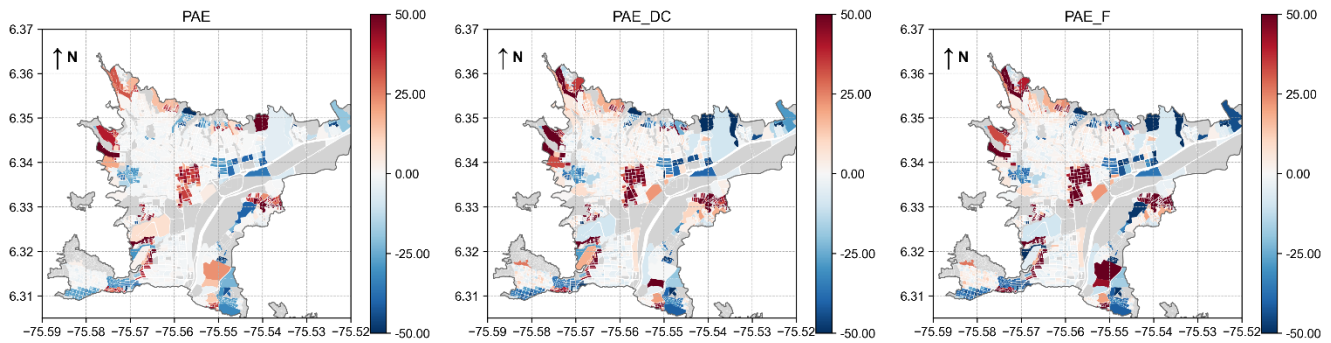
VS30 en centroide y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



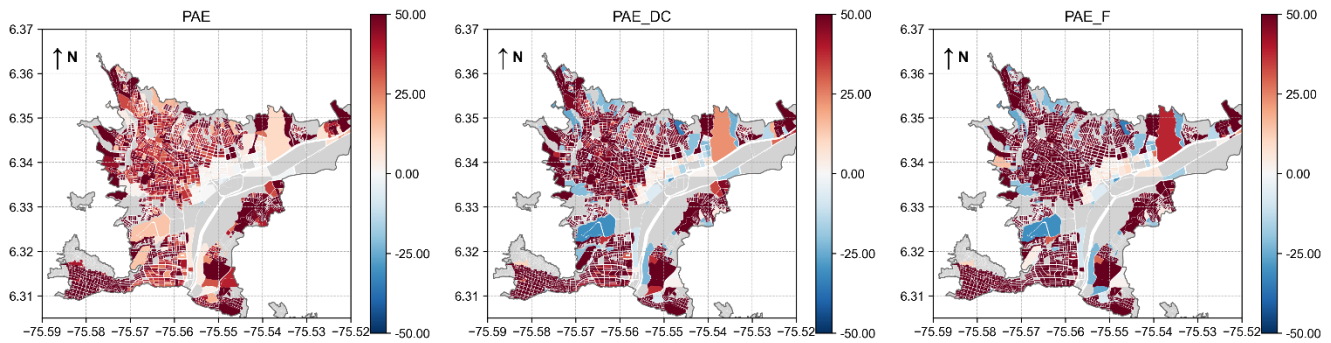
VS30 en centroide y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



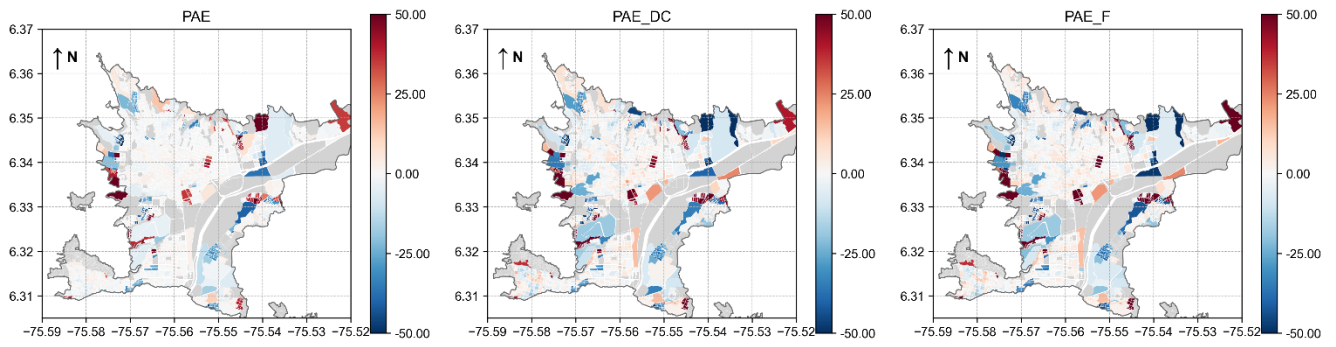
VS30 en centroide y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



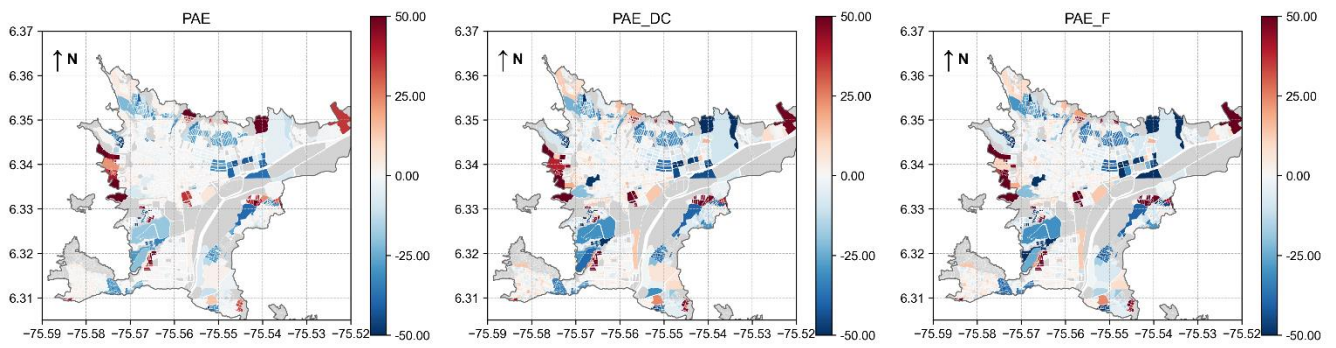
VS30 en centroide y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

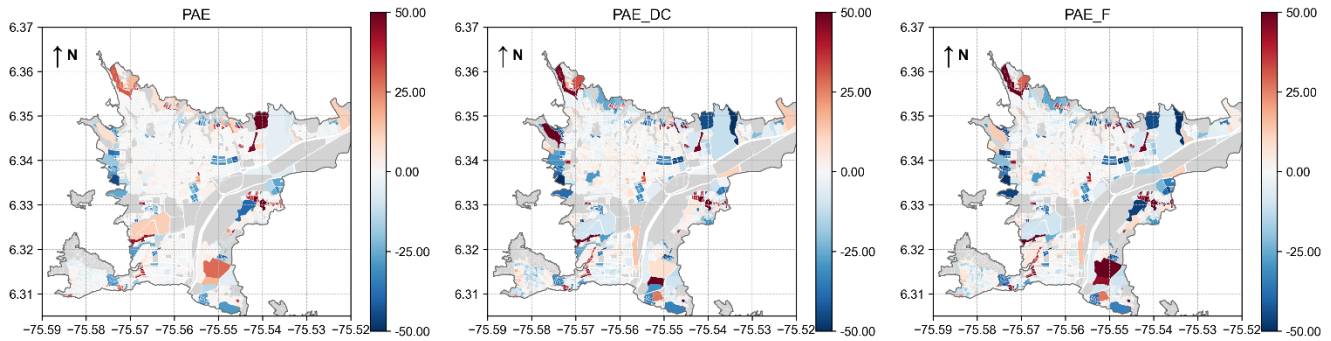


VS30 en centroide y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide

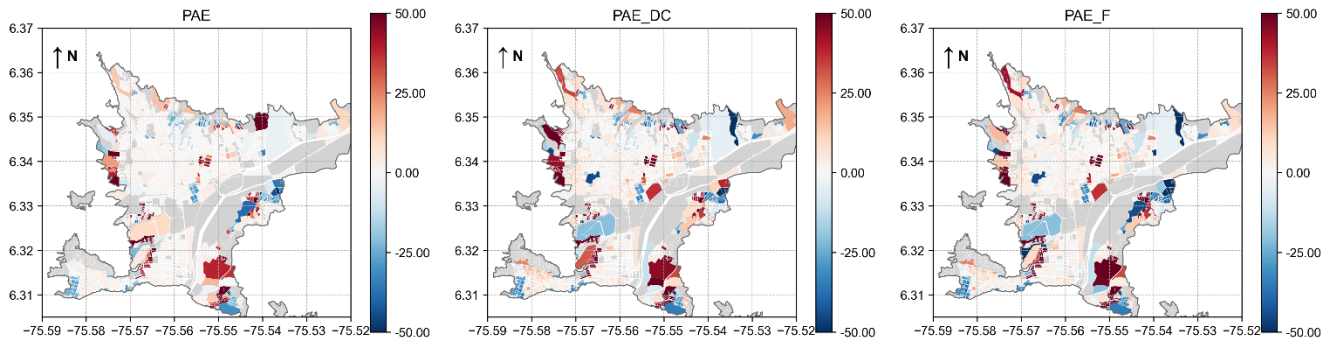


# Anexo K. Mapas de error para Bello con vs30 modal (elaboración propia).

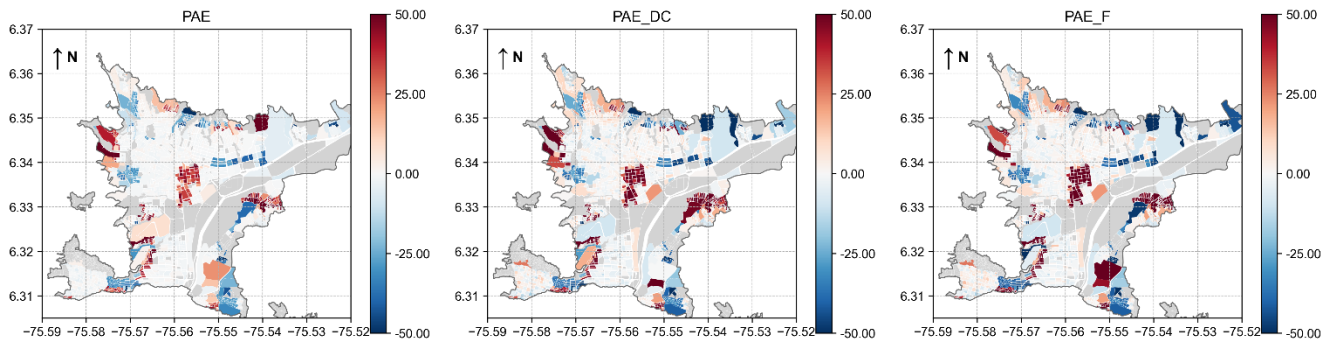
VS30 modal y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



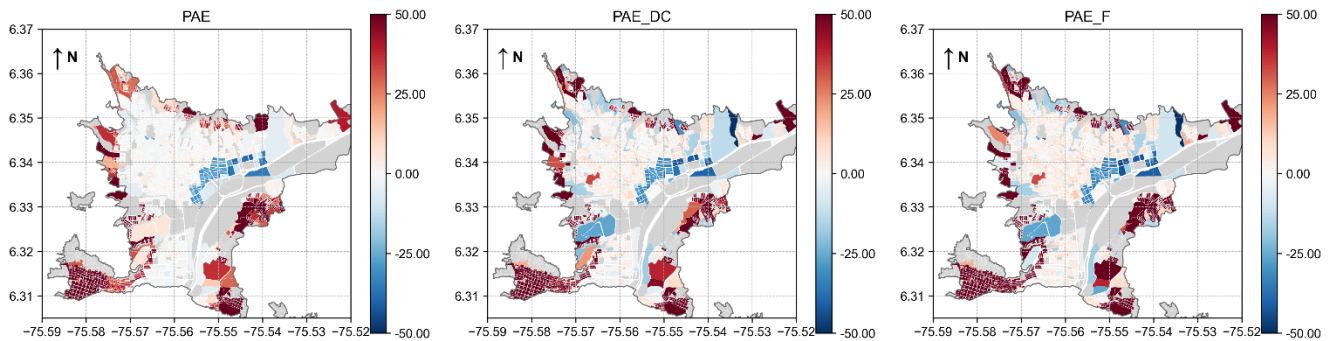
VS30 modal y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



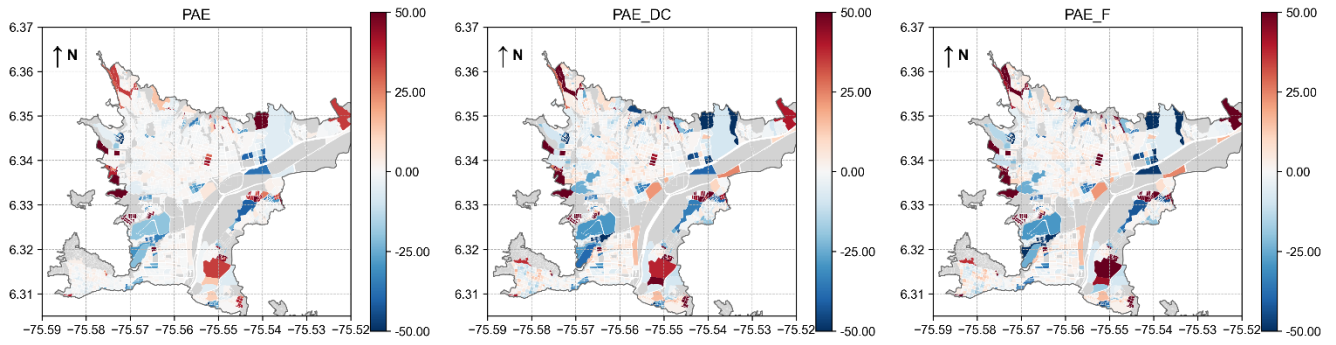
VS30 modal y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



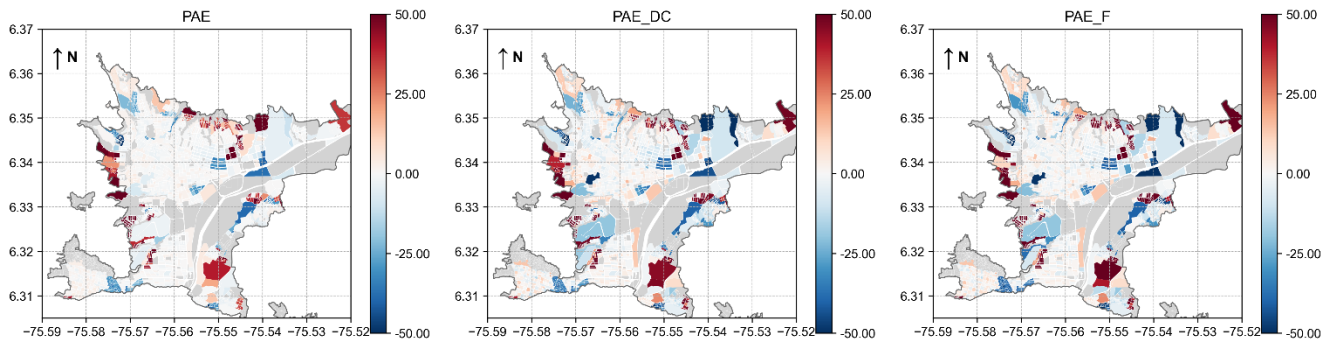
VS30 modal y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 modal y exposición agregada en  
Sección y ubicada en centroide

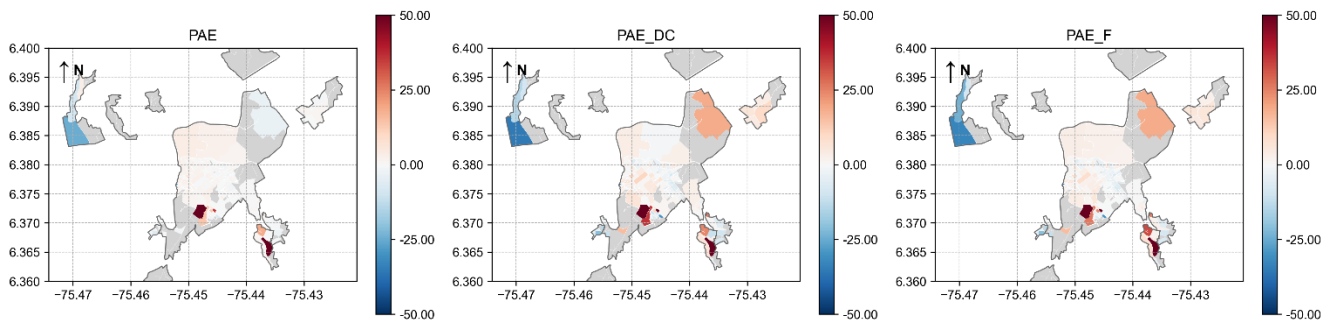


VS30 modal y exposición agregada en  
Sector y ubicada en centroide

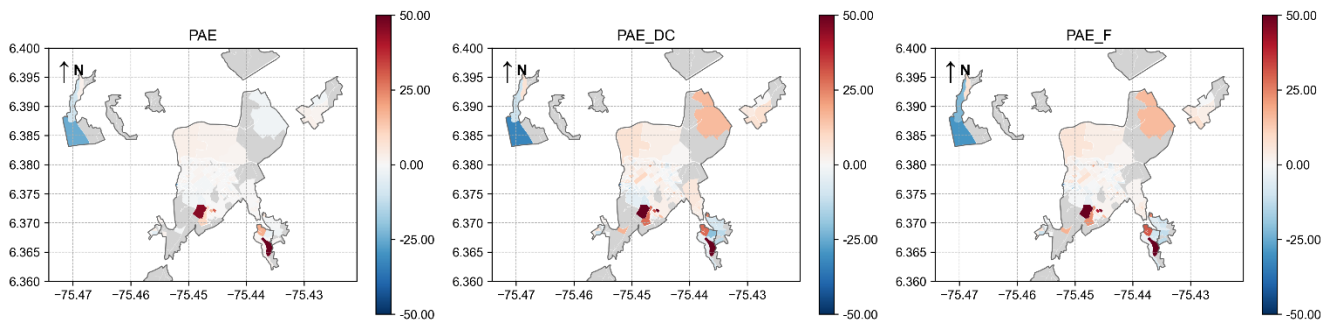


# Anexo L. Mapas de error para Girardota con vs30 diferenciado (elaboración propia).

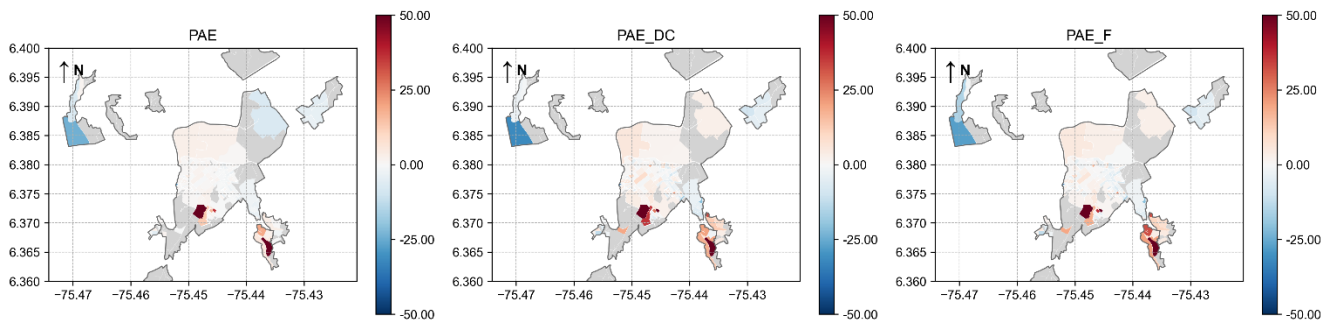
VS30 diferenciado y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



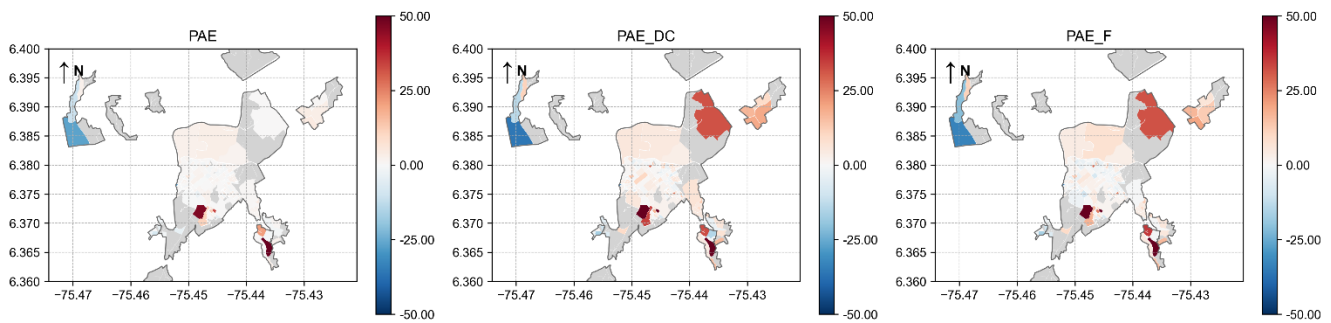
VS30 diferenciado y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



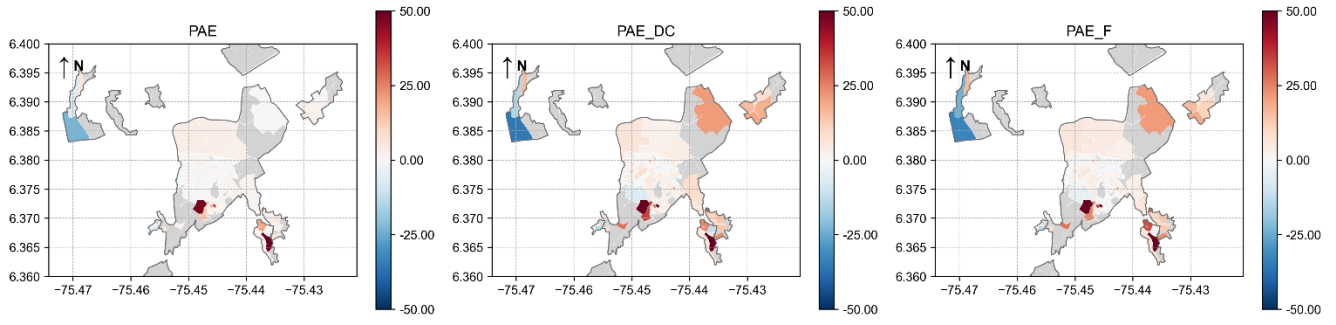
VS30 diferenciado y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



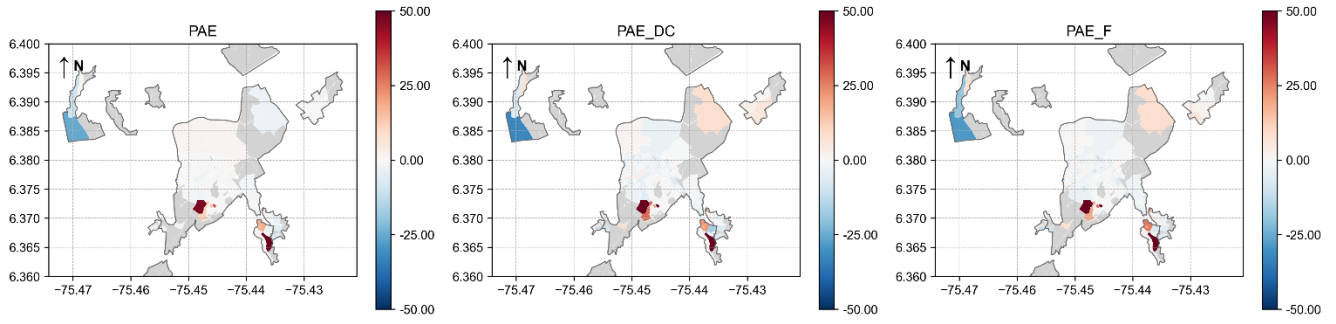
VS30 diferenciado y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 diferenciado y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

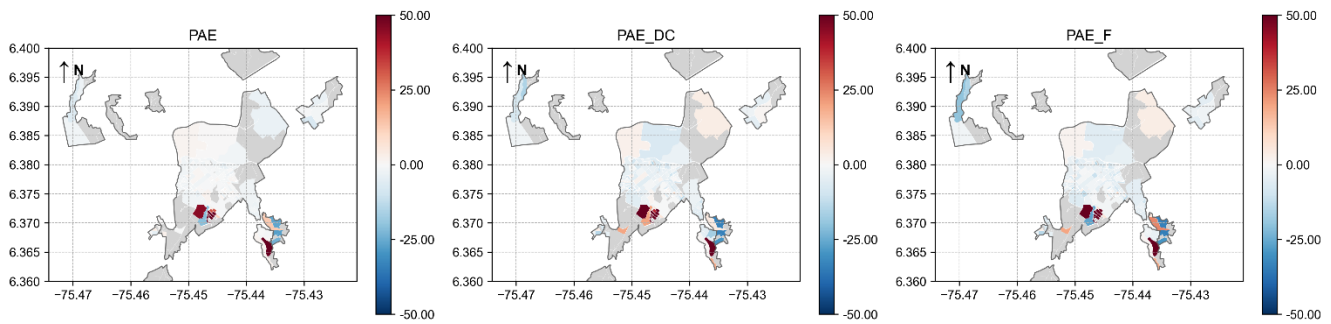


VS30 diferenciado y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide

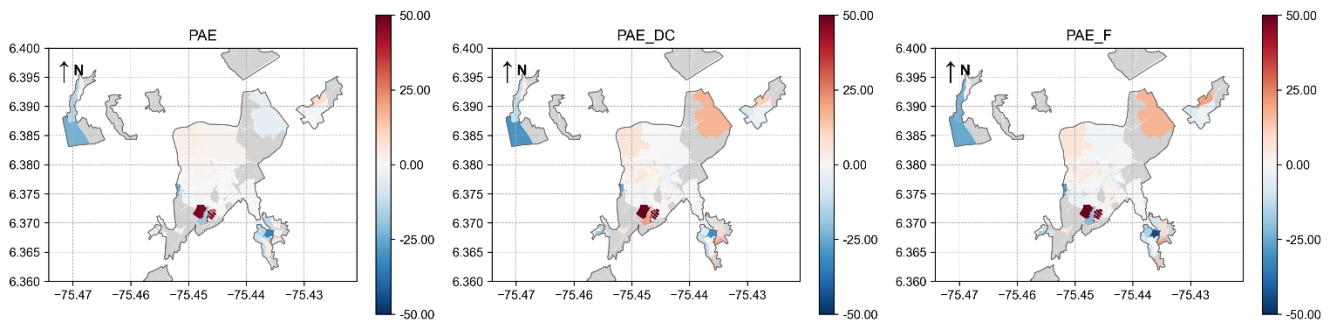


# Anexo M. Mapas de error para Girardota con vs30 en centroide (elaboración propia).

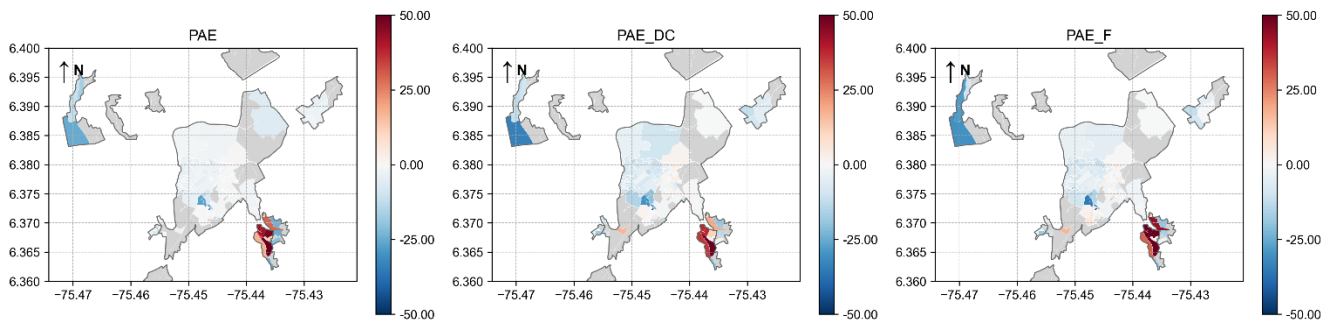
VS30 en centroide y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



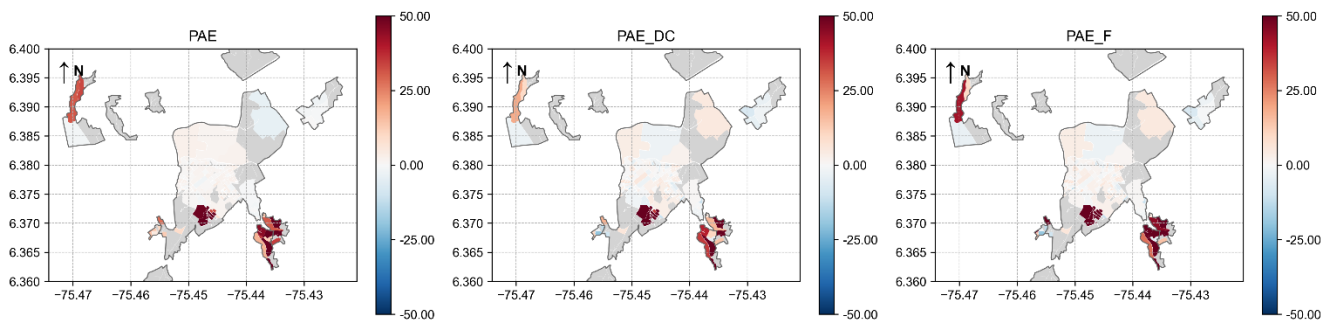
VS30 en centroide y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



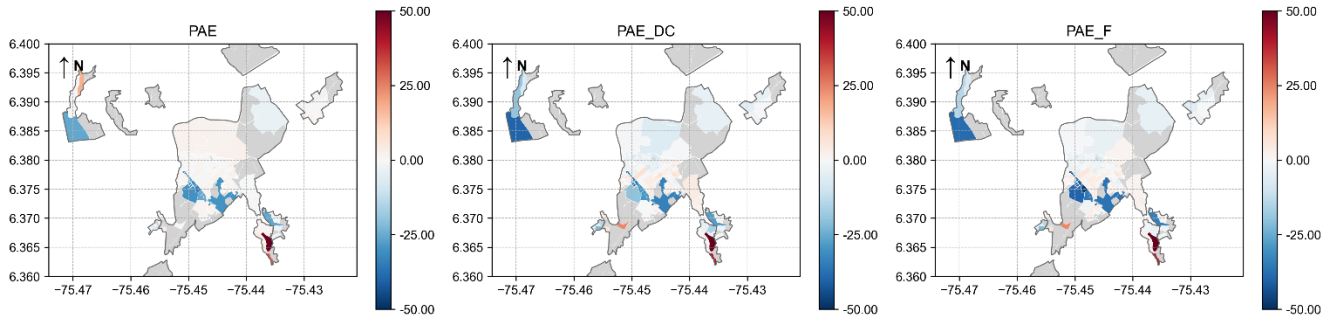
VS30 en centroide y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



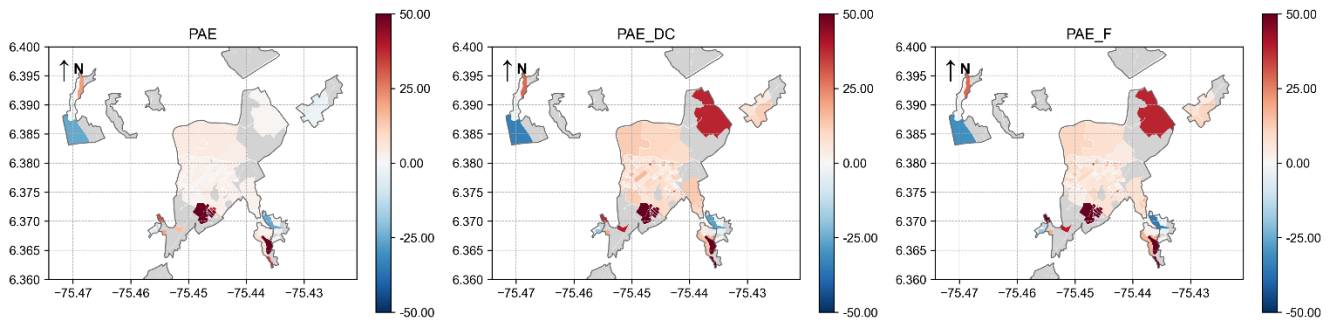
VS30 en centroide y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 en centroide y exposición agregada en Sección y ubicada en centroide

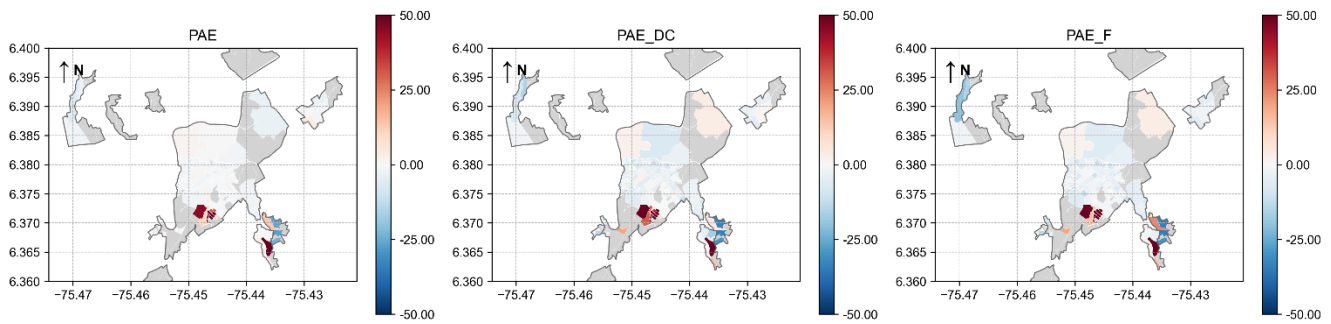


VS30 en centroide y exposición agregada en Sector y ubicada en centroide

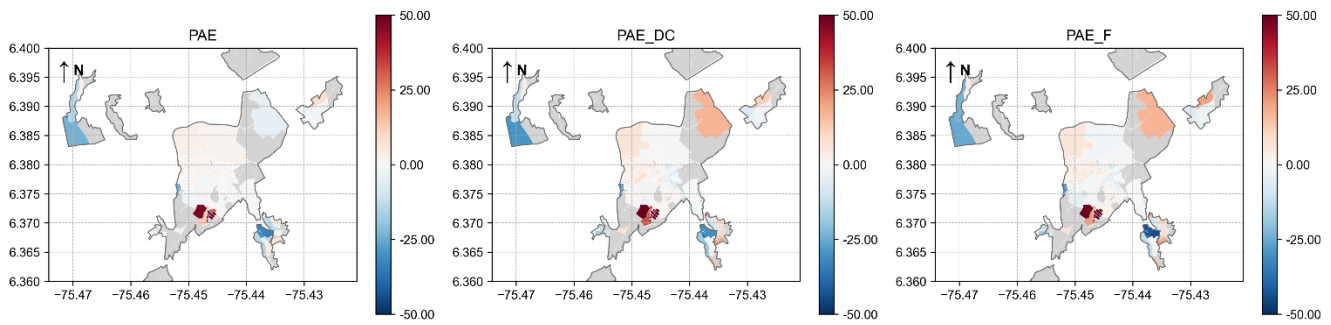


# Anexo N. Mapas de error para Girardota con vs30 modal (elaboración propia).

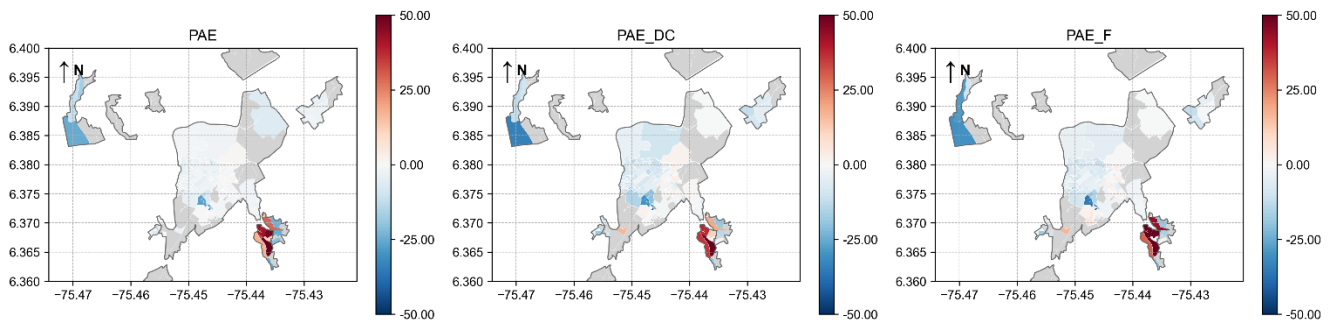
VS30 modal y exposición agregada en 500 m y ubicada en centroide



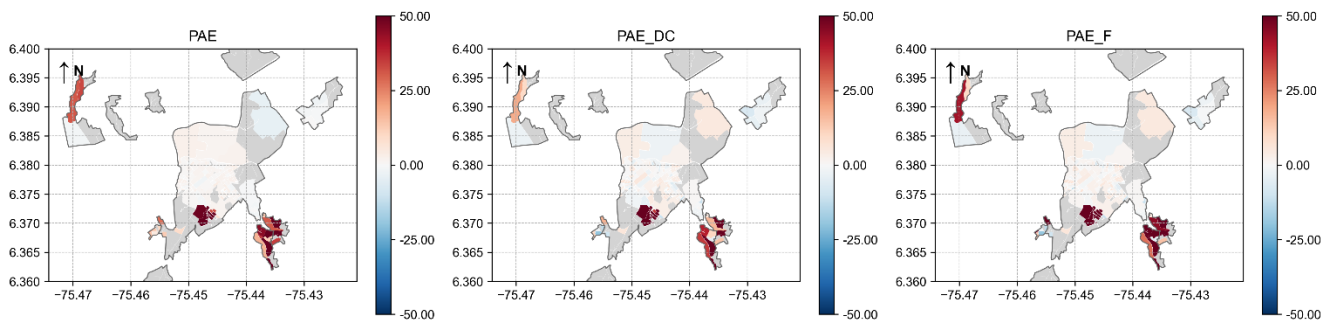
VS30 modal y exposición agregada en 750 m y ubicada en centroide



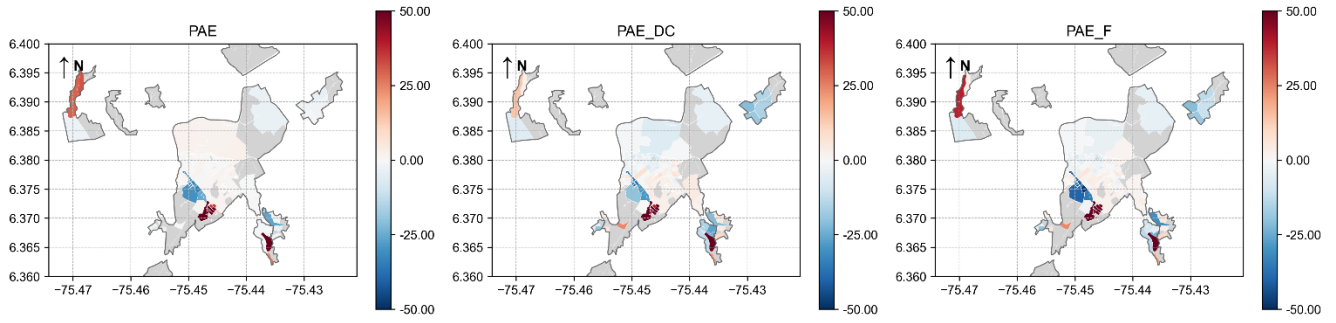
VS30 modal y exposición agregada en 1000 m y ubicada en centroide



VS30 modal y exposición agregada en Municipio y ubicada en centroide



VS30 modal y exposición agregada en  
Sección y ubicada en centroide



VS30 modal y exposición agregada en  
Sector y ubicada en centroide

