

Evaluación de la resiliencia de los barrios residenciales urbanos frente a inundaciones pluviales a partir de las perturbaciones en los desplazamientos de los residentes e implicaciones para la planificación: el caso de Shenzhen

Autores

CHENG Yulin, GAN Xinyue, YANG Xiaochun, GUO Renzhong

Resumen

Los barrios residenciales constituyen unidades básicas para analizar la resiliencia de la seguridad urbana y su diferenciación espacial. Los estudios existentes se apoyan en gran medida en datos estáticos para evaluaciones a escala macro, por lo que tienen dificultades para captar la evolución dinámica de la resiliencia urbana a escalas espaciales finas. Este estudio toma la perturbación espaciotemporal de la movilidad de los residentes durante los desastres como indicador central de resiliencia y desarrolla un marco de evaluación, basado en datos, de la resiliencia frente a inundaciones pluviales a escala de barrio. A partir de datos de señalización de telefonía móvil, el marco se aplica a 1.087 barrios residenciales de Shenzhen durante el periodo de precipitaciones concentradas de la lluvia extrema del "9.7" de 2023. Los resultados muestran que los barrios de vivienda comercial presentan una resiliencia significativamente mayor que las aldeas urbanas, mientras que los barrios construidos en distintos periodos exhiben una heterogeneidad clara tanto durante el desastre como en la etapa posterior. El análisis de correlación confirma que el anegamiento vial es un factor importante de perturbación de los desplazamientos de los residentes y valida la eficacia del marco para identificar diferencias espaciales en la resiliencia barrial. La validación demográfica revela además que el uso de datos de señalización móvil en evaluaciones de resiliencia a microescala puede subestimar los riesgos reales que afrontan los barrios envejecidos. El marco propuesto ofrece apoyo cuantitativo para el monitoreo dinámico y la alerta temprana ante desastres, el diagnóstico de renovación urbana y la planificación sostenible.

Palabras clave

resiliencia de barrios residenciales frente a inundaciones pluviales; datos de señalización de telefonía móvil; perturbación de desplazamientos; diferenciación espacial; marco de evaluación

Introducción

En un contexto de condiciones climáticas globales cada vez más extremas, la resiliencia climática urbana se ha convertido en un tema central tanto para la investigación internacional como para la práctica de la gobernanza. Como unidad básica de la gobernanza urbana, el barrio residencial no solo es el soporte espacial de la vida cotidiana, sino también la primera línea de la gestión de emergencias ante desastres. Metrópolis internacionales como Londres y Nueva York han incorporado el fortalecimiento de la capacidad barrial para resistir amenazas naturales en sus principales estrategias de adaptación climática [1]. En los últimos años, sin embargo, las ciudades supergrandes y megaciudades chinas han experimentado lluvias extremas frecuentes. Los sistemas climáticos pueden mantener una circulación residual activa mediante un "efecto tren", de modo que las precipitaciones intermitentes generan impactos secundarios continuos [2]. Estos eventos restringen gravemente el funcionamiento normal de las funciones urbanas, incluidas la producción y la vida cotidiana de los residentes, y retrasan la recuperación posterior al desastre.

Los estudios existentes suelen evaluar la resiliencia urbana a escala macro mediante indicadores estáticos, lo que dificulta identificar dinámicamente las diferencias de resiliencia a lo largo de todo el ciclo del desastre a escala de barrio. Por ello, este estudio introduce las características espaciotemporales de perturbación de los desplazamientos de los residentes y construye un marco de evaluación, basado en datos, de la resiliencia frente a inundaciones pluviales en barrios residenciales urbanos. El marco se utiliza para analizar la lluvia extrema del "9.7" de 2023 en Shenzhen. Identifica la heterogeneidad espaciotemporal de la resiliencia entre distintos tipos de barrios, valida el modelo con datos reales de anegamiento vial y revela posibles sesgos en la aplicación de macrodatos a evaluaciones de resiliencia a microescala. El método busca aportar soporte científico para una respuesta de emergencia refinada, diagnósticos de renovación barrial y planificación adaptada al clima.

1. Revisión de los métodos de evaluación de la resiliencia urbana frente a inundaciones pluviales

La investigación sobre resiliencia urbana ha experimentado un cambio de paradigma desde la vulnerabilidad hacia la resiliencia [3]. Los estudios tempranos [4-6] heredaron en gran medida el marco tradicional de vulnerabilidad basado en sistemas compuestos de indicadores y se centraron en atributos intrínsecos previos al desastre. Debido a las limitaciones de disponibilidad de datos, la selección y ponderación de indicadores incorporaba inevitablemente sesgos subjetivos. Tras el desarrollo, por parte de Cutter et al. [7-9], del índice de vulnerabilidad social y de los indicadores de resiliencia básica para comunidades, la atención investigadora se desplazó de la evaluación estática hacia la respuesta dinámica del sistema. Desde entonces, numerosos estudios han utilizado datos espaciotemporales de múltiples fuentes para captar las características procesuales de la resiliencia urbana.

La resiliencia urbana frente a inundaciones pluviales se refiere a la capacidad integral de un sistema urbano para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los impactos de lluvias torrenciales e inundaciones [10-11]. En consonancia con el concepto amplio de resiliencia, su significado central suele incluir tres dimensiones: reducir eficazmente la caída del desempeño durante el desastre, recuperarse con rapidez tras la perturbación y alcanzar un nivel de recuperación relativamente alto [12-15]. Su escala espacial abarca individuos o edificios, comunidades, ciudades y regiones [16-18]. Ya sea mediante análisis de escenarios basados en software de simulación [19], métodos de dinámica de sistemas con análisis de redes sociales [20], análisis empíricos apoyados en macrodatos [21-24] o curvas de resiliencia [25], la cuantificación de la resiliencia se ha convertido en una herramienta teórica ampliamente utilizada.

La investigación basada en curvas de resiliencia permite captar de manera sistemática la trayectoria temporal del desempeño del sistema antes y después de los desastres. Al extraer puntos clave, como los puntos de impacto, recuperación y estabilización, cuantifica el área total de perturbación, la tasa máxima de pérdida, la tasa de recuperación y la forma de la curva [26-29]. Este enfoque se ha convertido en un paradigma central en los estudios de resiliencia y se ha aplicado para describir la respuesta dinámica de funciones urbanas críticas, como redes de transporte, drenaje, suministro eléctrico, instalaciones médicas y producción económica [30]. Los macrodatos ofrecen soporte de alta resolución para analizar el comportamiento espaciotemporal de la población urbana y se aplican cada vez más a la modelización conductual durante desastres. Los estudios existentes han ampliado los marcos de curvas de resiliencia mediante redes sociales, trayectorias GPS y datos de señalización móvil. Algunos utilizan unidades diarias para identificar perturbaciones macro de largo plazo y patrones de recuperación bimodales [22]; otros emplean unidades horarias para captar el impacto de corto plazo de

lluvias extremas y encuentran que la recuperación del sistema puede rezagarse respecto al final del evento [23], o identifican efectos de recuperación diferida en los flujos de redes de movilidad [24]. Estos estudios revelan características de perturbación de desplazamientos causadas por el clima extremo, pero su tratamiento de los impactos multietapa de los desastres sigue siendo insuficiente.

La investigación existente suele combinar el impacto durante el desastre y la recuperación posterior en una única medida de perturbación, lo que dificulta distinguir los factores impulsores y los efectos acumulativos de ambas etapas y, por tanto, debilita la comprensión de los mecanismos del desastre. En particular, la evaluación dinámica de la resiliencia a escala de barrio aún carece de métodos adecuados. Pocos estudios logran cuantificar con eficacia los impactos de las lluvias torrenciales sobre el comportamiento de desplazamiento de los residentes en distintas etapas [31]. Para abordar esta brecha, este estudio construye curvas de fluctuación de los desplazamientos barriales de ciclo corto antes y después del desastre a escala horaria [32]. Utiliza el momento de eliminación del anegamiento para separar etapas. Las etapas convencionales de resistencia y recuperación se tratan como la etapa durante el desastre para cuantificar el impacto directo, mientras que se añade una etapa de perturbación diferida como etapa posterior al desastre para captar efectos secundarios. Este enfoque se ajusta a las características climáticas multietapa de las lluvias extremas, permite una evaluación dinámica de la resiliencia entre diferentes tipos de barrios urbanos y facilita la traducción del diagnóstico fino en implicaciones para la gobernanza de emergencias y la planificación [33].

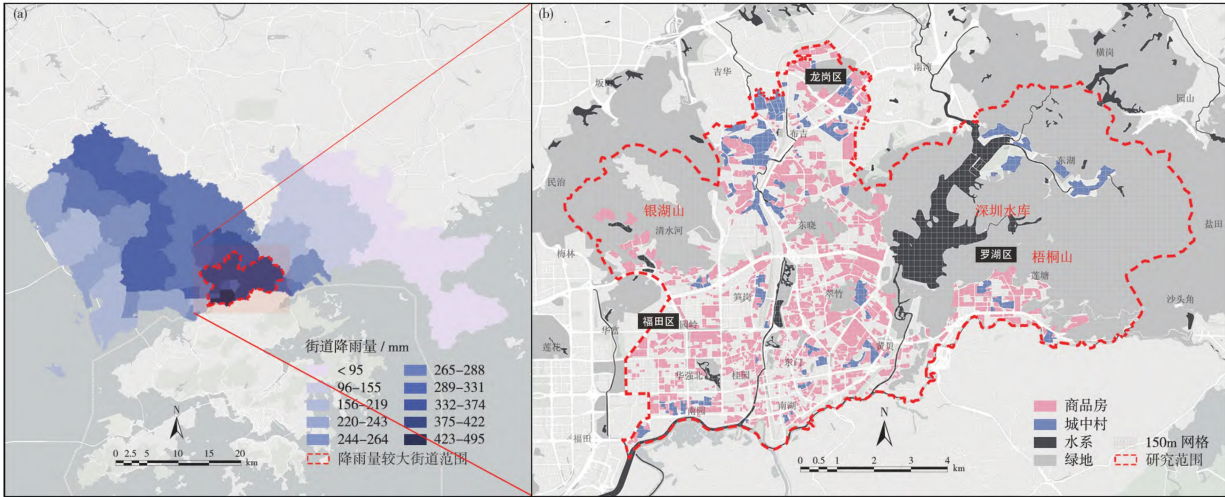
2. Área de estudio empírico y métodos de investigación

2.1 Área de estudio, fuentes de datos y procesamiento

Según el Observatorio Meteorológico de Shenzhen, entre las 17:00 del 7 de septiembre y las 6:00 del 8 de septiembre de 2023, Shenzhen experimentó una lluvia extrema que superó los registros históricos. El sistema convectivo intenso mostró un marcado "efecto tren", y las precipitaciones intermitentes siguieron afectando el proceso de recuperación posterior al desastre. Este estudio selecciona como área de investigación 14 subdistritos con precipitaciones concentradas, que incluyen la totalidad del distrito de Luohu, los subdistritos de Yuangang, Huaqiangbei y Nanyuan en el distrito de Futian, y el subdistrito de Buji en el distrito de Longgang (Figura 1).

Tomando como base los datos de áreas de interés de barrios residenciales de Baidu Maps, combinados con datos de OpenStreetMap, datos vectoriales de edificaciones de Shenzhen de 2018 y puntos de coordenadas de vivienda comercial de la plataforma Anjuke, el estudio identifica y depura 1.087 unidades de barrio residencial en el área de estudio, incluidas 103 aldeas urbanas y 984 barrios de vivienda comercial (Figura 1(b)). Las características de desplazamiento de los residentes se derivan de datos de señalización de telefonía móvil proporcionados por la plataforma China Unicom Smart Footprint DAAS. El conjunto de datos contiene aproximadamente un millón de trazas anonimizadas de movimiento de dispositivos en el área de estudio antes y después de la lluvia extrema, entre el 2 y el 24 de septiembre de 2023.

Además, la información sobre anegamiento vial durante la lluvia del "9.7" de 2023, publicada por la Oficina de Asuntos Hídricos de Shenzhen y la Oficina de Gestión de Emergencias, junto con datos de estructura demográfica a escala de calle procedentes del Séptimo Censo Nacional de Población de 2020, se utiliza para validar la fiabilidad del método de evaluación.



(a) 深圳“9·7”极端暴雨24 h降雨量空间分布示意图

(b) 研究范围内住区空间单元分布图

Figura 1. Área de estudio

La figura incluye un mapa de distribución espacial de la precipitación acumulada en 24 horas durante la lluvia extrema del "9.7" en Shenzhen y un mapa de las unidades espaciales de barrios residenciales dentro del área de estudio.

2.2 Métodos de investigación

Este estudio cuantifica el grado en que los barrios residenciales se ven afectados por lluvias extremas y su capacidad de recuperación calculando los cambios en el volumen de desplazamientos de los residentes durante el desastre en comparación con periodos sin desastre. A continuación, combina datos de anegamiento vial, áreas de captación peatonal, conectividad vial externa y estructura demográfica a escala de calle para una validación multidimensional. El proceso de evaluación contiene tres pasos clave (Figura 2).

2.2.1 Construcción de la base de datos de desplazamientos

El estudio utiliza lenguaje de consulta estructurado (SQL) en la plataforma DAAS para recopilar registros anonimizados de información espaciotemporal, garantizando el uso legal de los datos y la estricta protección de la privacidad de los usuarios. Los datos de límites de barrios residenciales se importan a la plataforma, y SQL se utiliza para calcular el volumen horario total de desplazamientos de cada barrio, formando una base de datos de desplazamientos barriales que cubre los periodos previo al desastre, durante el desastre y posterior al desastre.

El estudio selecciona los cambios en el volumen de desplazamientos entre el 6 y el 15 de septiembre de 2023, un periodo continuo de 10 días, como base para las curvas de fluctuación de desplazamientos. Este periodo cubre la lluvia extrema y una semana laboral posterior, lo que permite captar tendencias persistentes de movilidad después del desastre. Para evitar días festivos especiales, se seleccionan el 5 de septiembre, día soleado anterior a la alerta de desastre, y el promedio horario entre el 18 y el 22 de septiembre, una vez estabilizado el evento, como línea base de días laborales sin desastre. El 2 y 3 de septiembre, así como el 23 y 24 de septiembre, se utilizan para calcular líneas base de sábados y domingos sin desastre. En conjunto, se forman tres líneas base horarias de desplazamiento para cada barrio: día laborable, sábado y domingo.

Se utiliza una media móvil para generar las curvas de fluctuación de desplazamientos. La ventana se fija en 7 horas para suavizar el ruido y conservar al mismo tiempo las tendencias del desastre. El análisis preliminar muestra que más del 50 % de los barrios presentan un patrón escalonado de perturbación de desplazamientos de "impacto durante el desastre más perturbación diferida".

2.2.2 Evaluación y clasificación de la resiliencia barrial frente a inundaciones pluviales

Siguiendo la lógica central de las curvas de resiliencia, el estudio mide el desempeño del sistema en respuesta a un desastre a lo largo del tiempo continuo. Analiza los cambios en el volumen horario de desplazamientos de los residentes antes y después de la lluvia extrema y representa inversamente la resiliencia barrial frente a inundaciones pluviales mediante el grado de perturbación del comportamiento de desplazamiento de los residentes. El método se optimiza de forma adaptativa según las características climáticas de la lluvia del "9.7".

En primer lugar, se introduce una etapa de perturbación diferida para captar los impactos secundarios de las lluvias torrenciales sobre los desplazamientos de los residentes. El efecto de las lluvias sobre la movilidad suele ser multietapa: un impacto inicial directo de la precipitación va seguido de efectos rezagados causados por lluvias intermitentes, y los desplazamientos pueden permanecer perturbados durante varios días después de que termine la precipitación principal. Por tanto, a diferencia de estudios de resiliencia anteriores que se centran principalmente en un único choque, este estudio incorpora la perturbación diferida como etapa posterior al desastre en el cálculo de indicadores de resiliencia, lo que permite describir de manera más completa la resiliencia barrial a través de las distintas etapas de la lluvia extrema y sus impactos secundarios.

En segundo lugar, el rango de fluctuación de desplazamientos en ausencia de desastre se utiliza para determinar los puntos característicos del desastre. Dado que los desplazamientos diarios de los residentes varían de forma natural, el punto de impacto y el punto de estabilización no son puntos cero, sino intersecciones con el rango normal de fluctuación. El estudio define la diferencia en el volumen de desplazamientos en la hora t como ΔSt , calcula la desviación estándar σ de la secuencia de diferencias y utiliza σ como frontera de referencia del rango de fluctuación sin desastre.

En tercer lugar, el estudio construye una medida de intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos que refuerza el efecto acumulativo de la duración. Según las diferencias de intensidad y duración de la perturbación, esta se divide en tipos de alta intensidad a corto plazo y de intensidad media a largo plazo. Cuanto mayor es la duración, más tipos de actividades de desplazamiento se ven afectados y mayor es el consumo acumulativo de recursos y la pérdida socioeconómica. Por ello, la intensidad de perturbación A se pondera por el tiempo. El indicador compuesto destaca el coste acumulativo de la perturbación de desplazamientos a lo largo del ciclo del desastre [35] y se normaliza como "intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos" para permitir comparaciones entre barrios (Tabla 1). En comparación con los indicadores tradicionales, esta medida es más sensible a las diferencias de resiliencia entre unidades espaciales pequeñas.

Según el resumen de la Oficina Meteorológica de Shenzhen [Nota 1], se utiliza un umbral de 48 horas como línea divisoria entre las etapas durante y después del desastre. La perturbación durante el desastre corresponde a la suma de toda perturbación de desplazamientos antes de la línea de 48 horas, y la perturbación posterior se calcula del mismo modo después de ella. Si una perturbación cruza la línea de 48 horas, se asigna según el área mayor antes o después de dicha línea. Finalmente, se utiliza

agrupamiento K-means para clasificar por separado la resiliencia durante y después del desastre, mientras que el método del codo y el coeficiente de silueta determinan el número óptimo de grupos.

Tabla 1. Algoritmos de los indicadores

Indicador	Fórmula	Significado
Rango de fluctuación sin desastre	$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) * \sum_t (\Delta S_t - \text{mean}(\Delta S))^2}$, $N = 24 \text{ h}$	Sigma se calcula a partir de la diferencia en el volumen de desplazamientos entre dos días normales comparables dentro de 24 horas. Se utiliza como frontera de referencia para la fluctuación de desplazamientos sin desastre.
Intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos	$V1 = A1 / (N_i \cdot T1)$; $A1 = \int_{t0}^{t2} [\max(0, Q_{\max} - Q_t - \sigma)] dt$ ($t2 - t0$)	V1 es la intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos de la fluctuación inicial en el barrio i; N_i es la población total del barrio; A1 es la intensidad inicial de perturbación y refleja el efecto acumulativo de la disminución de desplazamientos desde el punto de impacto hasta el punto de estabilización; T1 es la duración de la perturbación; $Q_{\max}$ es la línea base de desplazamientos y Q_t es el volumen real de desplazamientos de los residentes.

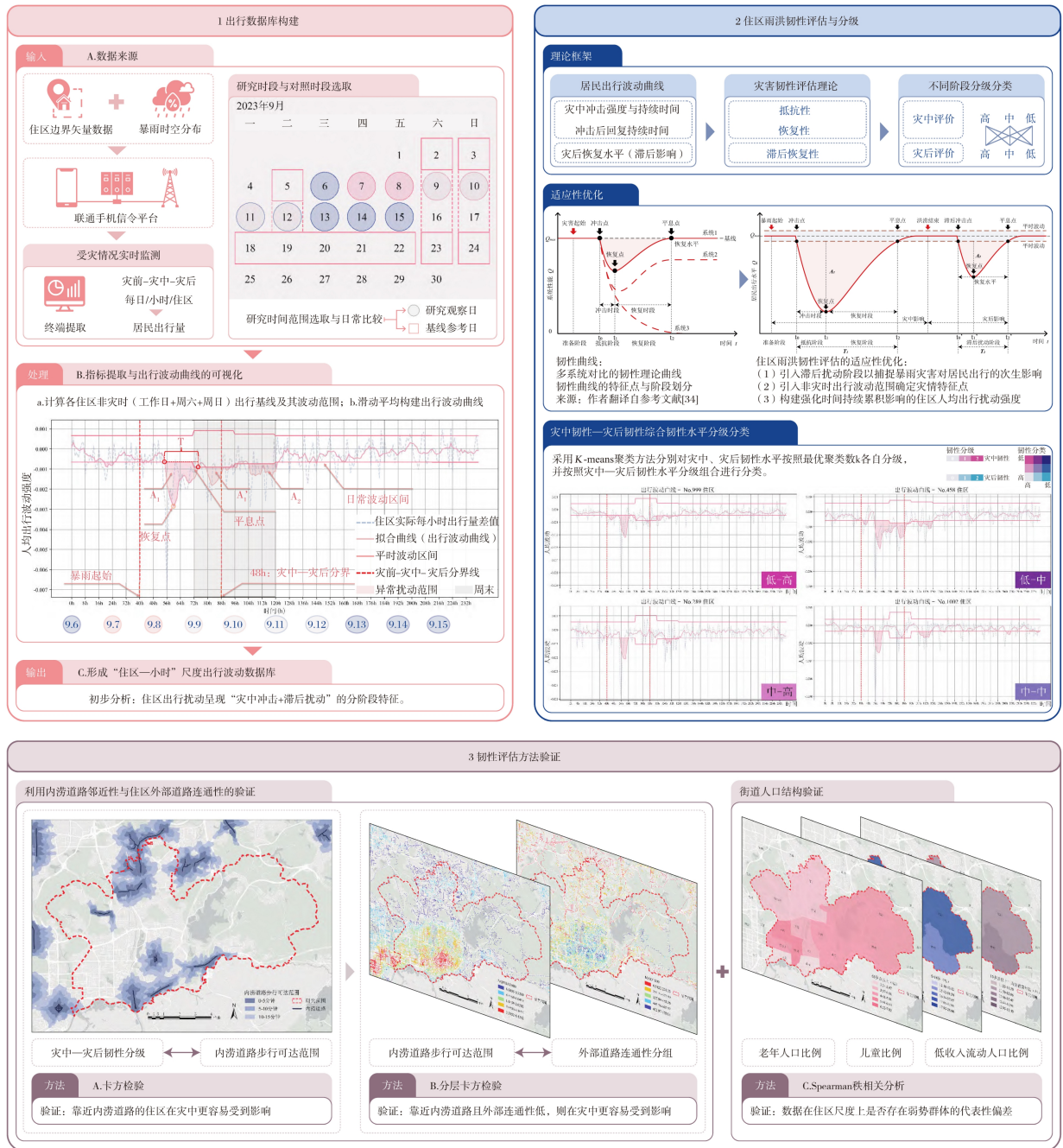
2.2.3 Validación del método de evaluación

Para validar la aplicabilidad y fiabilidad del método de evaluación en escenarios reales, el estudio introduce variables externas multidimensionales para la comprobación empírica.

En primer lugar, analiza la proximidad al anegamiento vial y la conectividad vial externa. Los residentes suelen cancelar desplazamientos cuando las rutas de viaje quedan bloqueadas por vías anegadas. Se espera que los barrios próximos a vías anegadas y con escasas opciones de ruta, operacionalizadas como baja conectividad vial externa, sufran mayores pérdidas funcionales y restricciones de desplazamiento bajo anegamientos por lluvia. Para contrastar esta hipótesis, el estudio construye zonas de influencia de accesibilidad peatonal hacia las vías anegadas con umbrales de más de 15 minutos, 10-15 minutos, 5-10 minutos y menos de 5 minutos. Se utiliza una prueba chi-cuadrado para examinar la significación de la asociación entre el grado de resiliencia y la proximidad a vías anegadas. Con base en la sintaxis espacial, se emplean la centralidad de intermediación, que representa la importancia estructural de la red vial, y la profundidad media angular, que representa la eficiencia de organización de rutas, para caracterizar la conectividad vial externa. Los barrios se dividen en grupos de baja y alta conectividad, y se realizan pruebas chi-cuadrado estratificadas para analizar la interacción entre la proximidad al anegamiento vial y la conectividad vial externa.

Debe señalarse que la elevación del barrio no se incluye como variable principal de validación. Aunque la elevación es un factor físico tradicional en la distribución de anegamientos, su relación con la profundidad del agua y las restricciones de desplazamiento está afectada por los sistemas de drenaje, la capacidad de la red de tuberías, la microtopografía, la permeabilidad del suelo y los arreglos de emergencia. Por tanto, la relación no es simplemente lineal. Además, la elevación del barrio refleja

principalmente el riesgo de que el propio barrio se inunde, pero no constituye un factor explicativo directo de que los desplazamientos de los residentes se vean afectados por condiciones de inundación. En segundo lugar, se utiliza la estructura demográfica a escala de calle para la validación. Para comprobar si los datos de señalización móvil contienen sesgos de representación a escala de barrio para grupos vulnerables como personas mayores, niños y parte de la población flotante de bajos ingresos, y para explorar la interpretabilidad social del método propuesto, el estudio introduce datos de estructura demográfica a escala de calle procedentes del Séptimo Censo Nacional de Población de Shenzhen. Estos incluyen la proporción de residentes de 65 años o más, la proporción de niños de 0 a 14 años y los años promedio de escolaridad de los residentes de 15 años o más. Se utiliza el análisis de correlación por rangos de Spearman para comprobar la fuerza y significación de la relación entre la resiliencia media a escala de calle y la estructura demográfica.



3. Resultados de investigación

3.1 Niveles de resiliencia barrial durante y después del desastre

Los resultados de agrupamiento de la intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos durante y después del desastre muestran que ambas curvas de suma de errores cuadráticos presentan un codo en $k = 3$, mientras que los coeficientes de silueta también son relativamente altos. Por tanto, los niveles de resiliencia durante y después del desastre se dividen en tres grados, etiquetados como 0, 1 y 2 para representar resiliencia alta, media y baja, y los barrios se clasifican además según la combinación de grados durante y después del desastre.

Los mapas de resiliencia (Figura 3) muestran que los barrios de baja resiliencia presentan patrones espaciales contiguos. Los barrios de baja resiliencia durante el desastre se concentran principalmente en el subdistrito de Liantang, en el distrito de Luohu, y en las áreas fronterizas entre los subdistritos de Dongmen, Huangbei y Nanhu. Estas zonas son relativamente bajas, y los sistemas de drenaje pueden no soportar precipitaciones intensas de corta duración, lo que provoca anegamientos severos e impactos directos sobre los desplazamientos de los residentes. Los nuevos barrios de baja resiliencia posterior al desastre se concentran principalmente en el subdistrito de Guiyuan, en Luohu, y el subdistrito de Nanyuan, en Futian. Estas áreas están próximas a agrupaciones comerciales y pueden verse afectadas por congestión de tráfico y actividad socioeconómica densa, lo que permite que la perturbación de desplazamientos continúe después de la lluvia. Los barrios con baja resiliencia tanto durante como después del desastre se concentran en el subdistrito de Buji, en el distrito de Longgang, donde se localizan numerosas comunidades antiguas y aldeas urbanas. El envejecimiento de la infraestructura y los sistemas de drenaje insuficientes hacen que estas áreas sean propensas al anegamiento e intensifican la perturbación persistente de los desplazamientos durante y después del evento. Además, zonas como Sungang y Qingshuihe, en el distrito de Luohu, muestran pequeños grupos contiguos, mientras que unos pocos barrios de baja resiliencia aparecen como casos aislados. Estos patrones reflejan la posible influencia del nivel de infraestructura, la eficiencia de gobernanza y las diferencias topográficas en la distribución de la resiliencia.

La comparación entre áreas muestra además que los barrios de baja resiliencia del área de estudio se concentran principalmente en Luohu y Longgang, mientras que Futian, con condiciones económicas más sólidas, presenta muchos menos barrios de baja resiliencia. Este resultado refleja la profunda influencia de la forma espacial urbana, la infraestructura del entorno construido y la asignación de recursos económicos sobre la resistencia barrial ante desastres. La comparación entre vivienda comercial y aldeas urbanas muestra que los barrios de baja resiliencia son principalmente aldeas urbanas. Algunas aldeas urbanas tienen una resiliencia mucho menor que barrios de vivienda comercial adyacentes, lo que indica déficits severos de infraestructura en partes del entorno construido de las aldeas urbanas y destaca su desventaja de resiliencia bajo las mismas condiciones geográficas.

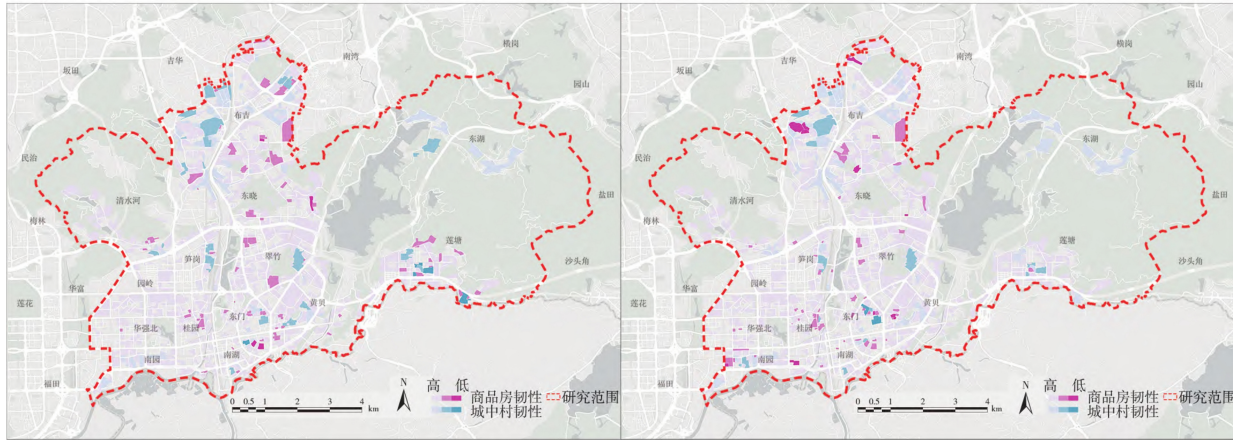


Figura 3. Mapas de resiliencia de barrios residenciales

La figura presenta mapas de resiliencia barrial durante y después del desastre, identificando áreas contiguas de baja resiliencia y sus diferencias entre Luohu, Futian y Longgang.

3.2 Diferencias de resiliencia durante y después del desastre según tipos de barrio

Con base en los resultados de evaluación de resiliencia, este estudio genera diagramas de caja y distribuciones de dispersión para analizar los cambios de resiliencia entre distintos tipos de barrios durante y después del desastre, revelando sus características diferenciadas de resiliencia (Figura 4).

Las aldeas urbanas muestran una menor resiliencia general durante y después del desastre. El diagrama de caja indica que el bigote superior de la perturbación durante el desastre se extiende de forma significativa, y varias muestras de perturbación extremadamente alta amplían el rango de distribución (Figura 4(a)). Esto puede atribuirse a infraestructura insuficiente y recursos sociales limitados, que amplifican los impactos del desastre. Aunque la perturbación posterior al desastre disminuye, sigue siendo relativamente alta y se aproxima al nivel de perturbación durante el desastre de los barrios de vivienda comercial, lo que indica efectos diferidos más fuertes durante la recuperación en las aldeas urbanas. En contraste, los barrios de vivienda comercial tienen una mediana menor de perturbación durante el desastre, aunque el diagrama de dispersión todavía muestra algunas muestras de baja resiliencia. Su perturbación posterior al desastre disminuye de manera significativa, posiblemente porque una mejor infraestructura y un apoyo suficiente de recursos sociales permiten una recuperación más eficiente.

El diagrama de caja por periodo de construcción (Figura 4(b)) muestra que los barrios de vivienda comercial construidos antes de 2000 y los construidos entre 2000 y 2010 presentan una resiliencia general similar. Sin embargo, el diagrama de dispersión revela más muestras de baja resiliencia entre los barrios anteriores a 2000, probablemente debido al envejecimiento de la infraestructura y a un apoyo social insuficiente. Los barrios de vivienda comercial construidos entre 2000 y 2010 se recuperan más rápido después del desastre, beneficiándose de estándares de planificación mejorados y de una actualización gradual del entorno construido. Los barrios construidos después de 2010 muestran la mediana más alta de perturbación de desplazamientos durante el desastre y un rango intercuartílico mayor, pero contienen el menor número de muestras dispersas de baja resiliencia y se recuperan más rápido después del desastre. Este patrón es coherente con una mejor infraestructura y asignación de recursos.

Aunque las suposiciones convencionales sugieren una correlación positiva entre periodo de construcción, calidad del barrio y resiliencia, este estudio encuentra que las diferencias de resiliencia durante el desastre revelan una heterogeneidad no lineal en la capacidad de resistencia y en los mecanismos de respuesta poblacional ante el impacto de las lluvias. En conjunto, la evaluación de la resiliencia barrial debe ir más allá de indicadores únicos del entorno construido y considerar los cambios dinámicos de la resistencia durante el desastre y la recuperación posterior. La baja resiliencia de las aldeas urbanas destaca la importancia de los atributos socioeconómicos y la asignación de recursos de emergencia, mientras que las diferencias entre periodos de construcción de vivienda comercial revelan la influencia de la evolución de la infraestructura.

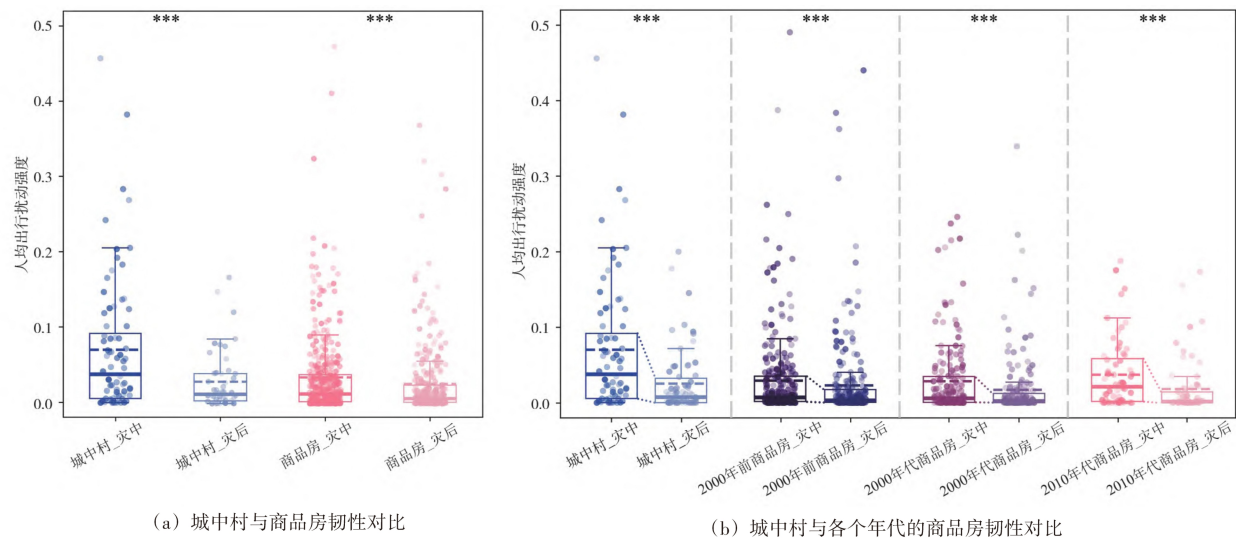


Figura 4. Diagramas de caja y distribución de dispersión de los niveles de resiliencia en áreas residenciales

La figura compara la resiliencia entre aldeas urbanas y barrios de vivienda comercial, y compara además las aldeas urbanas con barrios de vivienda comercial construidos en distintos periodos.

3.3 Validación de los resultados de evaluación de la resiliencia barrial

Los resultados de la prueba chi-cuadrado (Figura 5) muestran que la resiliencia durante el desastre se asocia significativamente con la distancia peatonal a vías anegadas ($\chi^2 = 14.5216$, $P = 0.0243 < 0.05$). Los barrios más próximos a vías anegadas tienen una probabilidad significativamente mayor de baja resiliencia durante el desastre. La asociación entre la resiliencia posterior al desastre y la distancia peatonal a vías anegadas no es significativa ($\chi^2 = 12.0748$, $P = 0.0603 > 0.05$), y solo muestra una tendencia marginal. Esto respalda la validez del método de evaluación: la resiliencia durante el desastre se ve afectada directamente por el anegamiento vial, mientras que la resiliencia posterior al desastre está influida por otros factores.

Las pruebas chi-cuadrado estratificadas dividen los barrios en grupos de baja y alta conectividad según la mediana de conectividad externa. Los resultados muestran que, en el grupo de baja conectividad, la resiliencia durante el desastre se asocia significativamente con la distancia peatonal a vías anegadas ($\chi^2 = 15.8262$, $P = 0.01472 < 0.05$). En el grupo de alta conectividad, esta asociación no es significativa ($\chi^2 = 9.0223$, $P = 0.1723 > 0.05$), lo que indica que el impacto del anegamiento se debilita cuando la conectividad externa es alta. Para la resiliencia posterior al desastre, ni el grupo de

baja conectividad ($\chi^2 = 10.8070$, $P = 0.0945 > 0.05$) ni el grupo de alta conectividad ($\chi^2 = 7.3557$, $P = 0.2892 > 0.05$) muestran una asociación significativa con la distancia peatonal a vías anegadas. Estos hallazgos revelan que la conectividad vial externa es un moderador importante del efecto de las vías anegadas sobre la resiliencia durante el desastre. Los barrios con baja conectividad son más propensos a experimentar restricciones severas de desplazamiento cuando las vías cercanas están anegadas, mientras que los barrios altamente conectados pueden mitigar los impactos mediante rutas alternativas y vías de drenaje. En conjunto, los resultados demuestran que el método propuesto puede captar eficazmente el impacto diferenciado de las vías anegadas sobre la resiliencia durante el desastre en los barrios circundantes.

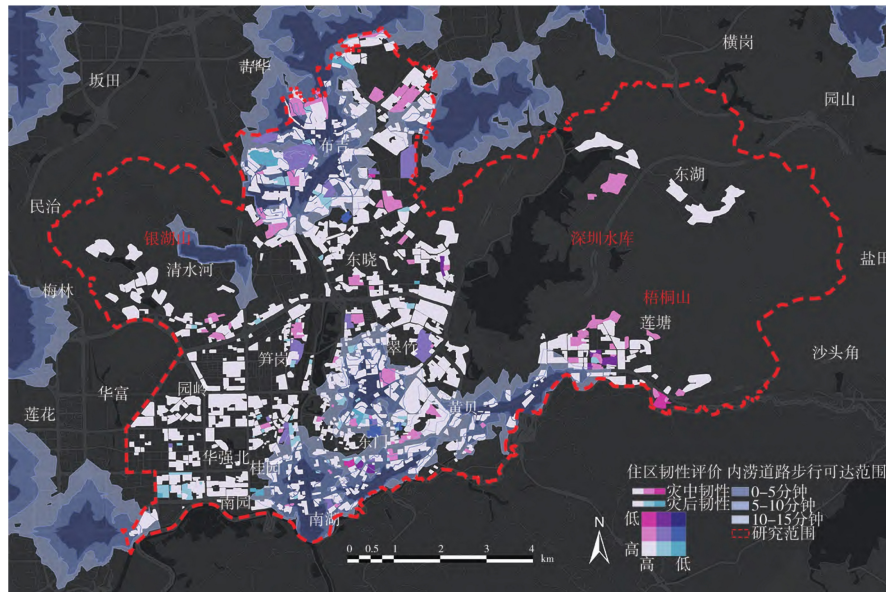


Figura 5. Validación mediante zonas de influencia estratificadas alrededor de vías anegadas

La figura valida la asociación entre resiliencia barrial, distancia peatonal a vías anegadas y conectividad vial externa durante y después del desastre.

Los resultados de correlación por rangos de Spearman entre los indicadores promedio de resiliencia a escala de calle y las variables de estructura demográfica se muestran en la Tabla 2. El indicador de perturbación durante el desastre presenta correlaciones débiles y no significativas con la proporción de personas mayores, la proporción de niños y los años promedio de escolaridad. En la etapa posterior al desastre, la intensidad de perturbación presenta correlaciones negativas significativas con la proporción de personas mayores y los años promedio de escolaridad, y una correlación negativa débil con la proporción de niños. Esto indica que, durante el desastre, la perturbación de desplazamientos es menos sensible al sesgo de estructura demográfica y está impulsada principalmente por bloqueos físicos repentinos; la invisibilidad de los grupos vulnerables en los datos de desplazamiento aún no se ha amplificado de manera significativa. En la etapa posterior al desastre, las correlaciones se fortalecen, lo que sugiere que el método capta una mayor sensibilidad socioeconómica en el proceso de recuperación diferida y puede identificar parcialmente los efectos diferenciados de la estructura demográfica sobre la perturbación retardada. Por ejemplo, las calles con niveles educativos más altos, que indican una menor proporción de residentes de bajos ingresos, muestran mayor resiliencia posterior al desastre.

Sin embargo, la correlación negativa significativa con la proporción de personas mayores indica cierto sesgo de representación en los datos de señalización móvil a escala de barrio. Dado que las personas mayores están subrepresentadas en la muestra, las reducciones de desplazamiento en algunos barrios, como los subdistritos de Yuanling y Cuizhu, contribuyen débilmente a la perturbación total de la muestra. Esto puede generar una ilusión estadística según la cual los barrios con más personas mayores parecen más resilientes. En otras palabras, depender únicamente de datos de señalización móvil puede subestimar los riesgos reales de desastre que afrontan los grupos vulnerables. Los estudios futuros deberían integrar datos censales o de encuestas muestrales a escala comunitaria para la calibración, de modo que la evaluación de la resiliencia sea más inclusiva.

Tabla 2. Análisis de correlación entre la resiliencia media a escala de calle y las variables de estructura demográfica en distintas etapas

Variable de estructura demográfica	Intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos durante el desastre	Intensidad per cápita de perturbación de desplazamientos posterior al desastre
Proporción de población de 65 años o más	-0.152	-0.530*
Proporción de niños de 0 a 14 años	-0.007	-0.380
Años promedio de escolaridad de la población de 15 años o más	-0.099	-0.582*

Nota: * indica significación al nivel de 0.05 (bilateral).

4. Discusión y conclusiones

4.1 Principales conclusiones y valor práctico

Este estudio construye un marco de evaluación de la resiliencia barrial frente a inundaciones pluviales basado en la perturbación espaciotemporal de los desplazamientos de los residentes durante lluvias torrenciales y lo contrasta empíricamente mediante la lluvia extrema del "9.7" de Shenzhen. Al analizar datos de señalización de telefonía móvil de aproximadamente un millón de dispositivos anonimizados, el estudio construye curvas de fluctuación de desplazamientos antes y después del desastre, cuantifica niveles de resiliencia durante y después del desastre y genera mapas de resiliencia barrial. La validez del método se comprueba mediante datos reales de anegamiento vial y estructura demográfica.

Los resultados muestran que los barrios de vivienda comercial son más resilientes que las aldeas urbanas, y que los barrios de vivienda comercial contruidos en distintos periodos también muestran una heterogeneidad significativa de resiliencia. El análisis de asociación basado en vías anegadas confirma que el anegamiento vial es un factor importante de perturbación de los desplazamientos de los residentes durante desastres y valida la eficacia del marco para identificar diferencias espaciales en la resiliencia barrial. Al mismo tiempo, la validación demográfica mediante estructura poblacional a escala de calle revela que los datos de señalización móvil pueden contener sesgos intrínsecos cuando se

utilizan para evaluaciones de resiliencia a microescala, con la posibilidad de subestimar los riesgos reales de los barrios envejecidos.

La mayoría de las evaluaciones existentes de resiliencia ante desastres se centran en evaluaciones estáticas a escala macro. Este estudio permite un juicio refinado a escala de barrio y destaca las ventajas del análisis dinámico y continuo de series temporales basado en las características de desplazamiento de los residentes. En comparación con estudios existentes de macrodatos que usan curvas de resiliencia, la optimización adaptativa propuesta ofrece una perspectiva más esclarecedora para comprender la heterogeneidad espaciotemporal de la resiliencia urbana frente a inundaciones pluviales y para apoyar la gobernanza de emergencias ante desastres. A diferencia de la simulación de escenarios dependiente de la elevación, este estudio no solo verifica la asociación significativa entre resiliencia durante el desastre y proximidad a vías anegadas, sino que también encuentra que los barrios de baja resiliencia no se restringen a una distancia fija respecto a dichas vías (Figura 5). Al mismo tiempo, aunque los barrios de baja elevación se consideran tradicionalmente áreas de alto riesgo, el estudio encuentra que esta suposición no coincide por completo con la perturbación real de los desplazamientos de los residentes. Algunos barrios cercanos a laderas, por ejemplo, tienen una topografía relativamente elevada pero baja resiliencia debido a la limitada disponibilidad de rutas. Por tanto, la evaluación dinámica basada en la movilidad puede captar impactos más complejos que la evaluación tradicional puede pasar por alto.

Este estudio también responde a la cuestión de la equidad social en la investigación sobre resiliencia urbana. La investigación existente [15] indica que los barrios socioeconómicamente desfavorecidos suelen tener menor resiliencia. Al comparar barrios de distintos periodos de construcción y tipos de propiedad, este estudio confirma además la relación entre factores socioeconómicos y resiliencia. Refleja las diferencias reales de resiliencia barrial causadas por déficits de infraestructura y asignación desigual de recursos durante la resistencia y la recuperación ante desastres. Los mapas de resiliencia a escala de barrio también ofrecen una representación más fina de la resiliencia a la microescala urbana.

4.2 Sugerencias para incorporar la evaluación de la resiliencia al examen urbano a escala de barrio

De acuerdo con documentos de política como las Directrices técnicas para el examen físico y la evaluación urbanos en la planificación territorial y espacial, el examen urbano se ha convertido en una herramienta institucional importante para promover el desarrollo urbano de alta calidad y abordar debilidades en los asentamientos humanos. La resiliencia es una dimensión importante del examen urbano actual. Frente a la falta de métodos sistemáticos para la evaluación dinámica de resiliencia a escala fina de barrio, este estudio propone un procedimiento de examen y evaluación de la resiliencia barrial frente a inundaciones pluviales impulsado por datos de señalización móvil. Puede pilotarse y promoverse dentro del examen urbano.

Para la renovación urbana y la gestión de emergencias por desastre a escala de barrio, el procedimiento incluye recopilación de datos, construcción de líneas base, división de etapas del desastre, cuantificación de perturbaciones y validación externa. Los resultados diagnósticos pueden retroalimentar las plataformas de información del examen urbano e incorporarse posteriormente a la preparación de planes de renovación urbana. Por ejemplo, los barrios de baja resiliencia pueden incorporarse a bases de datos de proyectos de renovación urbana y vincularse con microrrenovación progresiva, cierre de brechas de infraestructura azul-verde y mecanismos de coordinación comunitaria de emergencias. Ello puede formar una vía de gobernanza de ciclo cerrado de "examen y evaluación físicos - identificación

diagnóstica - rectificación priorizada y focalizada - monitoreo dinámico", apoyando el monitoreo rutinario basado en datos, la alerta temprana y las decisiones de planificación sostenible.

4.3 Limitaciones de la investigación y perspectivas futuras

La disminución del volumen de desplazamientos de los residentes no refleja únicamente el deterioro de las funciones del sistema barrial. El indicador de intensidad de perturbación de desplazamientos utilizado en este estudio no distingue entre desplazamientos obligatorios bloqueados y evitación voluntaria de desplazamientos flexibles, lo que puede subestimar la resiliencia de barrios con fuerte capacidad de gobernanza. La investigación futura puede desarrollar plataformas de fusión de datos de múltiples fuentes que integren puntos de interés, uso del suelo, teledetección satelital, señalización de telefonía móvil y datos de redes sociales. La predicción de series temporales mediante LSTM o redes neuronales de grafos puede utilizarse para agrupar trayectorias de desplazamiento y cuantificar por separado las fluctuaciones de movilidad obligatoria y flexible, proporcionando así apoyo decisional más específico para la gobernanza de la resiliencia.

El indicador central V1 es útil para revelar la capacidad acumulativa de carga de los barrios bajo perturbaciones por lluvia, pero un único indicador no puede equilibrar plenamente el riesgo agudo y la pérdida acumulativa de largo plazo. Los estudios futuros pueden construir indicadores compuestos que incorporen la tasa máxima de pérdida para captar la intensidad máxima del desastre y el riesgo agudo, y combinar la pendiente de recuperación y el agrupamiento por forma de curva para mejorar la precisión de la evaluación, al tiempo que distinguen los mecanismos de resistencia al riesgo agudo y de capacidad de recuperación de largo plazo entre barrios.

Notas

[1] La mayoría de los puntos de anegamiento se despejaron en un plazo de 48 horas, y la intensidad de la respuesta de emergencia disminuyó de forma significativa. El suministro de agua, el suministro eléctrico, las comunicaciones y otras infraestructuras críticas volvieron plenamente a la normalidad en un plazo de 72 horas. Fuente: Oficina Meteorológica de Shenzhen (Observatorio), "Actuar con el viento, combatir el viento y la lluvia, y construir la primera línea de prevención y reducción de desastres urbanos: registro de la respuesta de la Oficina Meteorológica de Shenzhen al tifón Saola y a la lluvia extrema del '9.7'".

Referencias

- [1] CHEN Yi, CHEN Ruishan, GE Yi. Investigación y reflexiones sobre la vulnerabilidad social y la resiliencia ante inundaciones en comunidades urbanas de China[J]. Urbanism and Architecture, 2018(35): 32-34.
- [2] CHEN Xunlai, XU Ting, WANG Rui, et al. Características observacionales de escala fina y causas de la lluvia extrema del "9.7" en el delta del río Perla[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(1): 1-16.
- [3] WEI Zongcai, LIN Yudong, WEN Xiaolan, et al. Avances de investigación sobre resiliencia urbana bajo clima extremo en China y en el extranjero: marcos conceptuales, medición y estrategias de optimización[J]. Planners, 2025, 41(7): 10-17.
- [4] CUTTER S L, FINCH C. Cambios temporales y espaciales en la vulnerabilidad social frente a amenazas naturales[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.

- [5] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN DER MEULEN F. Un índice de vulnerabilidad a inundaciones para ciudades costeras y su uso en la evaluación de impactos del cambio climático[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64: 73-105.
- [6] ZHANG Xiaorui, ZHANG Linya, FANG Chuanglin. Concepto, marco y medición: revisión y ampliación de la investigación sobre vulnerabilidad urbana[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(4): 94-99.
- [7] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Vulnerabilidad social ante amenazas ambientales[J]. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [8] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Indicadores de resiliencia ante desastres para comparar condiciones de referencia[J]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7(1): 51.
- [9] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. Las geografías de la resiliencia comunitaria ante desastres[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 29: 65-77.
- [10] TIMMERMAN P. Vulnerabilidad, resiliencia y colapso de la sociedad: revisión de las posibles aplicaciones climáticas del modelo[R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [11] ZHAI Guofang. Respuestas resilientes a desastres urbanos de inundación pluvial desde la perspectiva de la planificación bajo el cambio climático: conceptos clave, ideas básicas y marco general[J]. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 29-37.
- [12] HOLLING C S. Resiliencia y estabilidad de los sistemas ecológicos[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [13] ADGER W N. Resiliencia social y ecológica: ¿están relacionadas?[J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.
- [14] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Cambios de régimen, resiliencia y biodiversidad en la gestión de ecosistemas[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1): 557-581.
- [15] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Evaluación de la resiliencia urbana: múltiples dimensiones, criterios e indicadores[M]//YAMAGATA Y, SHARIFI A. *Resiliencia urbana: un enfoque transformador*. Cham: Springer, 2016.
- [16] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Definir la resiliencia urbana: una revisión[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [17] SPAANS M, WATERHOUT B. Construir resiliencia en ciudades de todo el mundo: Róterdam como participante en el Programa 100 Ciudades Resilientes[J]. *Cities*, 2017, 61: 109-116.
- [18] GUO Renzhong, YANG Xiaochun, HONG Wuyang, et al. Lógica básica y marco para la planificación y el diseño de ciudades seguras y resilientes[J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(4): 28-42.
- [19] CHEN Bilin, LI Yinglong. Evaluación de la planificación de transformación adaptativa para ciudades costeras de alta densidad orientada a la resiliencia frente a inundaciones: estudio de caso del área de manglares de la bahía de Shenzhen[J]. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 77-86.
- [20] LIU C, XU F, GAO C, et al. Inferencia de resiliencia mediante aprendizaje profundo para sistemas complejos en red[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 9203.

- [21] FAN Yating, LI Yuefan, TU Wei, et al. Evaluación de la vulnerabilidad de los cuerpos urbanos portadores de desastres apoyada en datos de redes sociales: estudio de caso de clima extremo en Shenzhen[J]. *City Planning Review*, 2024, 48(08): 101-113.
- [22] HSU C W, MOSTAFAVI A. Desagregación de arquetipos y propiedades de curvas de resiliencia en sistemas humanos ante amenazas meteorológicas[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 11897.
- [23] ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Evaluación de la perturbación de la movilidad humana urbana bajo eventos meteorológicos extremos: estudio de caso en Nanjing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101671.
- [24] TANG J, ZHAO P, GONG Z, et al. Patrones de resiliencia de la movilidad humana en respuesta a inundaciones urbanas extremas[J]. *National Science Review*, 2023, 10(8): nwad097.
- [25] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. Marco para evaluar y mejorar cuantitativamente la resiliencia sísmica de las comunidades[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [26] HONG B, BONCZAK B J, GUPTA A, et al. Medición de la desigualdad en la resiliencia comunitaria ante desastres naturales mediante datos de movilidad a gran escala[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1870.
- [27] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. Marco de análisis de resiliencia en tres etapas para sistemas de infraestructura urbana[J]. *Structural Safety*, 2012, 36: 23-31.
- [28] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Metodología para evaluar la resiliencia de infraestructuras en red[J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174-180.
- [29] QIAN J, DU Y, LIANG F, et al. Medición de la desigualdad de resiliencia comunitaria ante inundaciones interiores mediante macrodatos conscientes de la ubicación[J]. *Cities*, 2024, 149: 104915.
- [30] YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. Planificación de la ciudad resiliente de Shanghái: cuestiones clave, marco general y estrategias de planificación[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28.
- [31] YANG Junyan, CAO Jun. Dinámico, estático, explícito e implícito: cuatro modos de aplicación de macrodatos en el diseño urbano[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(4): 39-46.
- [32] PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, et al. Acoplamiento de múltiples riesgos en el espacio urbano y respuestas de planificación resiliente[J]. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 88-97.
- [33] PAN Haixiao, DAI Shenzhi, ZHAO Yanjing, et al. Discusión académica sobre "resiliencia urbana y planificación espacial en respuesta al cambio climático"[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(5): 1-10.
- [34] NAN C, SANSVINI G. Método cuantitativo para evaluar la resiliencia de infraestructuras interdependientes[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 35-53.
- [35] POULIN C, KANE M B. Curvas de resiliencia de infraestructuras: medidas de desempeño e indicadores sintéticos[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 216: 107926.

Traducción asistida por IA