

Del acoplamiento estático a la interacción dinámica: un método inteligente de diseño urbano a escala mesoscópica*

HUANG Yuyue, YANG Junyan, SUN Haocheng, YANG Qingxin, CUI Ao

Resumen. El diseño urbano a escala mesoscópica constituye el eslabón clave entre la escala urbana macroscópica y la escala microscópica de la manzana, y asume simultáneamente la coordinación del orden funcional bidimensional y del orden morfológico tridimensional. Sin embargo, ante la rápida evolución de las demandas urbanas, los métodos tradicionales se ven limitados por un modelo estático y unívoco de acoplamiento «función–morfológica» y por una capacidad de ajuste relativamente baja. A partir de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo, este estudio propone una vía de diseño urbano inteligente a escala mesoscópica compuesta por tres módulos: control de red, generación iterativa de alternativas y comparación-optimización. Con base en las características espaciales de los elementos acoplados de función y morfológica, se identifican diversos modos de interacción, entre ellos el acoplamiento elevado, la concentración nuclear, el desarrollo axial, el predominio funcional y el predominio morfológico. Estos modos se aplican después a prácticas de diseño inteligente en un área de muestra. Los resultados indican que el método incrementa de forma significativa la diversidad de las propuestas y la eficiencia del proceso, mejora la capacidad de adaptación de los proyectos y ofrece una vía eficaz para avanzar hacia una interacción dinámica en el diseño urbano futuro.

Palabras clave: diseño urbano inteligente; escala mesoscópica; interacción dinámica; distribución funcional; morfológica espacial.

Clasificación de la Biblioteca China: TU984. Código del documento: A. DOI: 10.16361/j.upf.202503004. Número de artículo: 1000-3363 (2025) 03-0025-09.

* Proyecto principal de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China «Construcción de prototipos tecnológicos de edificación neutra en carbono para entornos urbanos de alta densidad» (n.º 52394224); Programa Nacional Clave de Investigación y Desarrollo «Tecnologías clave de diseño urbano inteligente para la optimización espacial del entorno construido» (n.º 2024YFC3807900).

El Reglamento sobre la gestión del diseño urbano señala que esta disciplina constituye un medio eficaz para aplicar la planificación urbana, orientar el diseño arquitectónico y conformar una identidad urbana propia [1]. Ante la complejidad de las demandas económicas, sociales y ecológicas, el diseño urbano busca, mediante distintas vías, «crear formas espaciales tridimensionales en el entorno urbano» [2], con el fin de optimizar de manera integral dicho entorno [3]. En la etapa media y avanzada de la nueva urbanización china, su papel resulta especialmente importante para mejorar la calidad del espacio urbano y alcanzar un desarrollo sostenible.

Las características multiescalares de la compleja megasistema urbana determinan contenidos y prioridades diferenciados en el diseño. El diseño urbano a escala mesoscópica se dirige principalmente a sectores urbanos con relativa autonomía funcional y coherencia ambiental [4], e incluye varios niveles, desde la ciudad y la comunidad hasta la calle y el edificio [5]. Situado entre el diseño urbano general de escala macroscópica y el diseño detallado de la manzana a escala microscópica, asume dos responsabilidades complementarias [6]: por un lado, construir una organización funcional razonable a partir del control estructural establecido en la escala superior; por otro, coordinar la intensidad de desarrollo, la altura edificatoria y otros parámetros morfológicos, con el fin de orientar el diseño de las manzanas. Esta gestión integrada de la función y la forma convierte la escala mesoscópica en un eslabón decisivo para materializar las intenciones del diseño urbano.

La transformación continua de las necesidades sociales exige una concepción más flexible, capaz de asegurar la interacción dinámica entre las funciones y las formas urbanas. No obstante, los métodos actuales todavía presentan limitaciones en diversidad y eficiencia. Por una parte, el diseño tradicional suele basarse

en juicios subjetivos y desarrolla una única modalidad estática de acoplamiento entre función y morfología [7], por lo que difícilmente puede responder a la variedad de interacciones. Los métodos inteligentes sustentados únicamente en la transferencia estilística de casos existentes también carecen de adaptabilidad ante entornos complejos y específicos [8]. Por otra parte, cada nuevo emplazamiento puede requerir reconstruir la lógica de diseño subyacente [9]. El proceso resulta prolongado y laborioso, y la ausencia de mecanismos eficaces de retroalimentación en tiempo real [10] dificulta el ajuste y la optimización oportunos, lo que limita su aplicación a gran escala.

A partir de estas limitaciones, el estudio toma como base las características de acoplamiento entre función y morfología a escala mesoscópica y utiliza métodos de inteligencia artificial autoaprendientes para afrontar los problemas de diversidad y eficiencia. El objetivo es simular una interacción dinámica entre ambos sistemas y superar la dependencia del conocimiento subjetivo o de grandes bibliotecas de casos. Asimismo, se aplican procesos diferenciados de iteración y optimización de acuerdo con distintos modos espaciales de acoplamiento, con el fin de mejorar la adaptabilidad y la eficacia de las soluciones. La verificación empírica muestra que el método propuesto puede reproducir el proceso dinámico en el que función y morfología se influyen, cooperan y compiten, y puede generar múltiples propuestas en un plazo breve, ofreciendo una referencia útil para el diseño urbano del futuro.

1 Reflexiones sobre el diseño urbano a escala mesoscópica

1.1 Clave: distribución funcional bidimensional y diseño morfológico tridimensional

Como «manifestación visible de la estructura profunda y de las leyes de desarrollo del espacio urbano» [11], la función y la morfología han constituido siempre el núcleo del diseño urbano. Por un lado, la distribución funcional bidimensional determina directamente la dirección futura del desarrollo, la eficiencia del uso del espacio y la calidad de vida. A escala mesoscópica, traduce la orientación funcional definida en el nivel macroscópico y proporciona la base para organizar las funciones edificatorias en el nivel microscópico. Por ello, debe desarrollar una distribución más precisa de los usos a partir de las grandes categorías de suelo. La integración de los elementos funcionales desde una lógica racional y orientada a la eficiencia permite una planificación más exacta y un aprovechamiento intensivo del territorio.

Por otro lado, la morfología espacial tridimensional es la expresión externa del diseño urbano y refleja de forma directa la identidad cultural y el valor estético de la ciudad. El diseño morfológico mesoscópico prolonga el control general de la estructura urbana establecido en la escala macroscópica, organiza con mayor detalle las formas de las manzanas y transmite al nivel inferior requisitos tridimensionales específicos. Se concentra principalmente en la altura, la densidad edificatoria y la intensidad de desarrollo, corrigiendo tanto la excesiva generalidad de la regulación morfológica macroscópica como la fragmentación del diseño microscópico.

En síntesis, la clave del diseño urbano a escala mesoscópica consiste en coordinar, a partir de los objetivos de la planificación superior, la distribución funcional bidimensional y la forma tridimensional del sector, orientar el diseño posterior de las manzanas y alcanzar un equilibrio bidireccional entre función y morfología.

1.2 Problema: el desajuste entre función y morfología provoca desorden espacial

La función y la morfología son los dos componentes centrales del sistema espacial mesoscópico. Se influyen mutuamente y se entrelazan en el espacio. En general, se considera que un acoplamiento dinámico eficaz permite, bajo la restricción de recursos territoriales limitados, aprovechar al máximo el potencial de cada sistema y crear una situación de desarrollo mutuamente reforzado. Se trata de una vía esencial para mejorar la eficiencia del funcionamiento urbano y garantizar la sostenibilidad [12].

Sin embargo, a medida que las ciudades se desarrollan con rapidez, las condiciones existentes se vuelven más complejas y los actores participantes más diversos. El desajuste entre actividades funcionales cambiantes y formas espaciales fijas se hace cada vez más visible, especialmente en la contradicción entre

funciones de baja densidad y escasa vitalidad y morfologías edificatorias de alta intensidad. Para los residentes, una distribución inadecuada de los espacios de producción y vida intensifica la congestión, favorece las islas de calor y la contaminación del aire y reduce la calidad de vida. Para la gestión urbana, el desequilibrio entre función y morfología provoca una falta de correspondencia entre la oferta y la demanda de recursos espaciales, limita la liberación de vitalidad y genera consumos innecesarios, desembocando finalmente en desorden espacial y en un desequilibrio de las relaciones entre población y territorio.

1.3 Dificultad: interacción dinámica entre función y morfología a escala mesoscópica

Para el diseñador, lograr una interacción dinámica entre función y morfología a escala mesoscópica plantea numerosos desafíos. En primer lugar, resulta difícil descomponer el mecanismo de interacción. La ciudad es un sistema en evolución continua: las necesidades de la población y la estructura social cambian con el tiempo, y la relación entre función y espacio fluctúa bajo la acción conjunta de factores externos —políticas de planificación y redes de transporte— e internos —condiciones naturales, economía y población— (fig. 1). La modificación de una zona funcional puede alterar la morfología general, mientras que la evolución de esta última puede retroalimentar la distribución funcional. Esta «indivisibilidad» y «previsibilidad incompleta» [13] dificultan el análisis y la anticipación precisos de los cambios espaciales.

En segundo lugar, la retroalimentación dinámica es tardía. Las decisiones y la ejecución de los proyectos están condicionadas por múltiples grupos de interés y por la complejidad del entorno construido. Los diseñadores deben ajustar y comprobar reiteradamente las propuestas a partir de los resultados de cada etapa. La falta de métodos y herramientas eficientes retrasa todo el proceso de retroalimentación y reduce la eficacia de las soluciones.

Para resolver esta dificultad es necesario superar las limitaciones de los métodos tradicionales. A partir de una comprensión de los mecanismos dinámicos entre función y forma, debe desarrollarse una metodología inteligente caracterizada por un proceso rápido, una amplia gama de escenarios de aplicación y un bajo umbral de participación [14], capaz de promover un desarrollo acoplado y evolutivo de ambos sistemas.

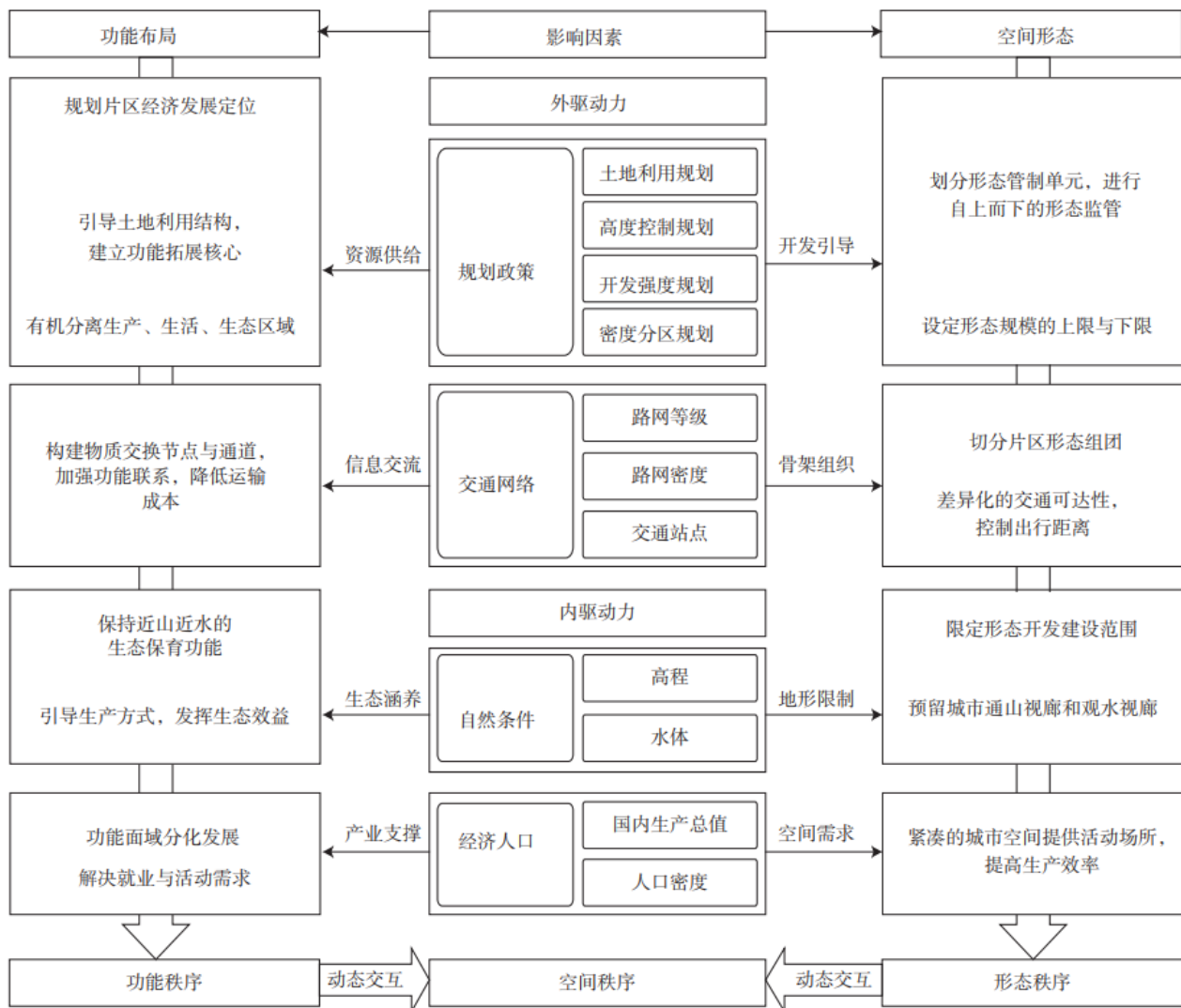


Figura 1. Mecanismo de influencia de múltiples factores sobre la interacción dinámica entre función y morfología

2 Construcción de una vía inteligente de diseño urbano a escala mesoscópica

2.1 Fundamentos metodológicos

2.1.1 Elementos de acoplamiento entre función y morfología

La coordinación entre sistemas espaciales no implica una superposición completa ni una independencia absoluta, sino una unidad armónica de sus elementos en el nivel estructural. De acuerdo con las teorías espaciales de la localización clásica, los «nodos, redes y superficies» constituyen los tres elementos básicos del desarrollo espacial [15]. De manera análoga, los elementos de acoplamiento entre función y morfología pueden abstraerse como puntos, líneas y superficies [16].

En el sistema funcional, los puntos representan los centros de las principales funciones públicas y los espacios centrales de la producción y la vida cotidiana. Las líneas corresponden a los canales de conexión entre los grandes centros funcionales; suelen estar constituidas por bandas de funciones públicas situadas a lo largo de vías principales, cursos de agua o espacios verdes, y forman corredores económicos. Las superficies se refieren a ámbitos de zonificación funcional, como agrupaciones empresariales, residenciales o administrativas. Los núcleos funcionales, los corredores económicos y las superficies funcionales de base componen la estructura que guía el desarrollo mesoscópico.

En el sistema morfológico, los puntos suelen manifestarse como grandes complejos de edificios públicos o conjuntos de torres de oficinas, que actúan como hitos y referencias [17]. Las líneas se forman mediante secuencias continuas de edificios altos o franjas de baja densidad que configuran corredores visuales. Las

superficies constituyen el tejido básico de la forma urbana y se generan a partir de la ocupación edificatoria de cada manzana. Los grupos de hitos, los corredores visuales y las superficies construidas conforman conjuntamente una estructura morfológica reconocible.

Los elementos funcionales y morfológicos construyen la estructura espacial global mediante un ciclo de retroalimentación basado en el acoplamiento y la simbiosis. Por una parte, los elementos funcionales impulsan la formación de la morfología. En el proceso clásico de diseño, primero se determinan los núcleos funcionales y la orientación de los corredores económicos según los objetivos de desarrollo y los recursos del lugar, y posteriormente se desarrolla la forma espacial. Las características de esta última dependen en gran medida de la racionalidad de la organización funcional [18], que le proporciona un marco interno de soporte. Por otra parte, los elementos morfológicos retroalimentan la función. El espacio físico ofrece el medio material para incubar actividades y mejorar la distribución funcional. Una morfología compacta y diversa atrae a más usuarios y aumenta la vitalidad. Vinculados por las actividades humanas y regulados por el mercado, el gobierno y otros actores, ambos sistemas se optimizan continuamente de acuerdo con el uso del espacio [19] y forman, mediante una interacción dinámica, una estructura urbana relativamente estable.

2.1.2 Marco técnico basado en el aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje por refuerzo^① es un paradigma de autoaprendizaje automático guiado por el rendimiento del entorno. A diferencia de los algoritmos supervisados, no requiere un entrenamiento previo con grandes conjuntos de muestras, sino que selecciona las acciones siguientes a partir de señales de recompensa y de la experiencia acumulada. Puede adaptarse a múltiples estados posibles del entorno y tomar decisiones frente a los cambios, por lo que resulta adecuado para resolver problemas de diseño en espacios urbanos dinámicos [20].

Tomando como fundamento teórico la interacción dinámica entre los elementos funcionales y morfológicos, cada manzana se considera un agente espacial y la generación de un proyecto urbano se entiende como un proceso de cooperación, interacción y juego entre múltiples agentes. Una red de política define las acciones funcionales y morfológicas ejecutables; una red de evaluación utiliza como función de beneficio el grado de coordinación del acoplamiento entre ambos sistemas. El proceso de decisión de Markov conduce la iteración de las propuestas y la interacción persona-máquina permite compararlas y optimizarlas. Esta lógica se organiza en tres módulos: control de red, iteración de soluciones y comparación-optimización (fig. 2).

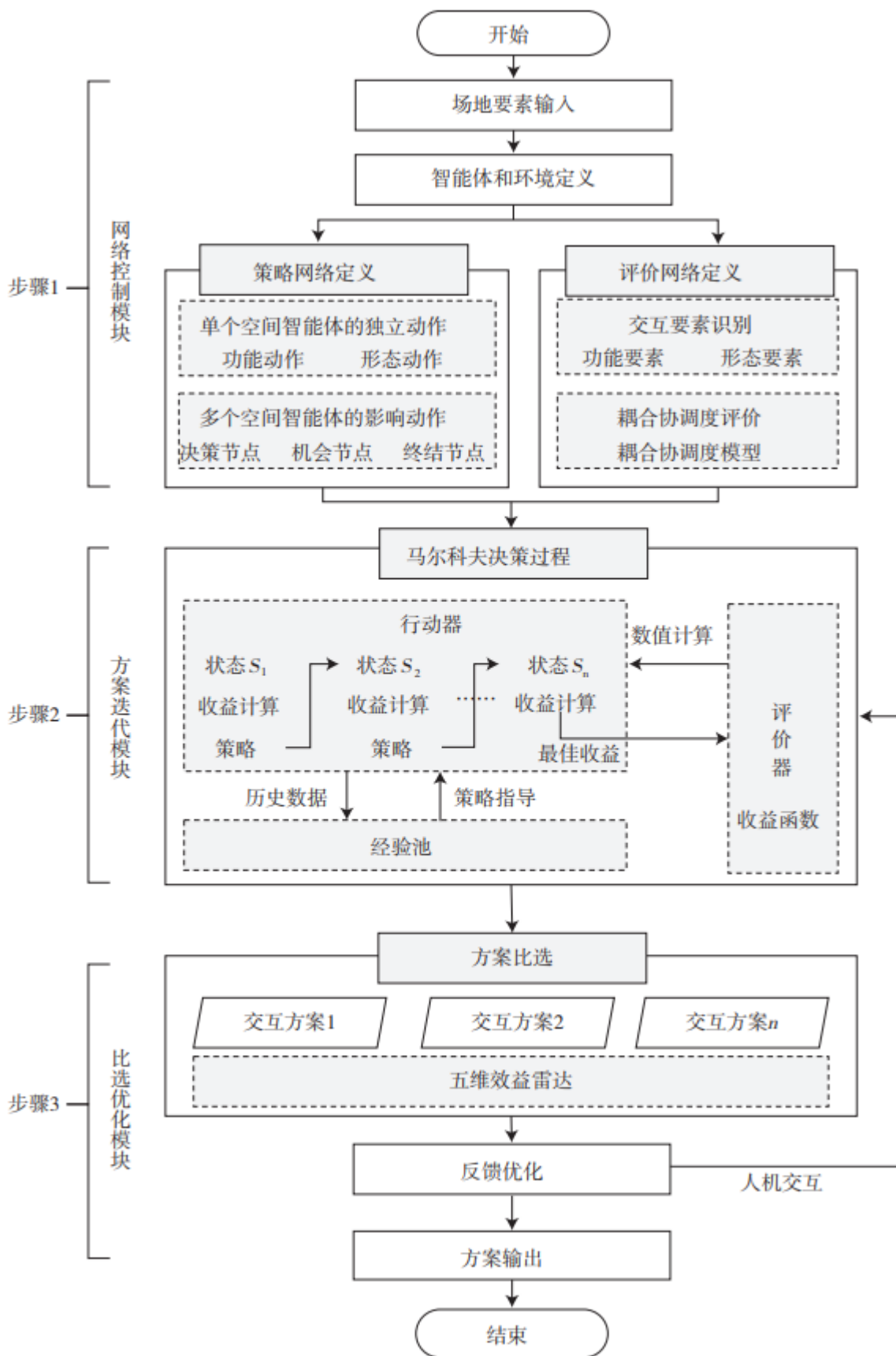


Figura 2. Ruta técnica del diseño inteligente de la interacción «función–morfología» a escala mesoscópica

2.2 Módulo de control de red del diseño urbano inteligente

2.2.1 Construcción de la red de política a partir de acciones funcionales y morfológicas

La red de política define las acciones funcionales y morfológicas de cada agente-manzana y las interacciones entre múltiples agentes.

(1) Red de política de un agente espacial individual

Para las acciones independientes de una manzana, los espacios de acción se definen como $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ y $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$. Bajo la retroalimentación de la red de evaluación, el agente ejecuta en cada etapa una acción funcional a_t y una acción morfológica b_t .

En el plano funcional, las nuevas categorías de suelo habitualmente incorporadas al diseño mesoscópico son B, A, G y R. Dado que B1 y B2 presentan diferencias morfológicas importantes, se consideran acciones funcionales independientes. En conjunto, estas acciones corresponden a los servicios orientados a la vida cotidiana, los servicios a la producción, los servicios de interés público, los parques y espacios verdes y la función residencial.

En el plano morfológico, se establecen nueve indicadores agrupados en tres dimensiones: escala, carácter emblemático y diversidad (tabla 1). Los intervalos de generación de estos indicadores se determinan de acuerdo con los requisitos de la planificación superior.

Tabla 1. Indicadores morfológicos del diseño urbano a escala mesoscópica

空间形态属性	指标名称	计算方式	指标释义
规模性	总体积/m ³	$V_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n V_i$	V_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体体积
	总基底面积/m ²	$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n S_i$	S_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体的基底面积
	建筑密度	$B = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S}$	S为街坊面积
	容积率	$P = \frac{V_{\text{sum}}}{S}$	/
	平均高度/m	$H_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{sum}}}{S_{\text{sum}}}$	/
标志性	最高高度/m	H_{max}	/
	最大基底面积/m ²	S_{max}	/
多样性	高度错落度	$D_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{avg}})^2}}{n}$	H_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体高度
	基底面积错落度	$D_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{avg}})^2}}{n}$	S_{avg} 为街坊内的平均基底面积

(2) Red de política de múltiples agentes espaciales

Las manzanas no son unidades completamente independientes separadas por la red viaria, sino una red espacial compleja vinculada por la atracción de los efectos de aglomeración y por las restricciones de equilibrio [21]. Dentro de un determinado radio, el cambio de las propiedades funcionales o morfológicas de una manzana puede modificar las de otras. Por ello, es necesario definir un espacio de acciones y un espacio de estados que formalicen la influencia entre agentes.

El espacio de acciones representa el alcance dentro del cual la modificación de una manzana provoca cambios en otras. La investigación utiliza el algoritmo de K vecinos más próximos y considera como área de influencia las nueve manzanas más cercanas al agente objetivo. El espacio de estados corresponde a todo el sector de estudio, de modo que la variación de cualquier agente puede influir en el estado global.

Cuando una manzana periférica adopta una nueva acción bajo la influencia del agente objetivo, pasa a actuar como un nuevo agente y continúa influyendo en sus vecinos. Una iteración sin límites podría generar un número infinito de estados ambientales. Considerando las restricciones computacionales y la necesidad de conservar diferencias entre propuestas, el número de iteraciones se limita mediante tres tipos de nodos tomados de los árboles de decisión. El nodo de decisión es el agente que modifica su acción por primera vez; el nodo de oportunidad, el que cambia su estado por primera vez bajo la influencia del anterior; y el nodo terminal, el que vuelve a cambiar por segunda vez como consecuencia de esa influencia. Las manzanas situadas más allá del nodo terminal conservan su estado.

A partir de esta estructura se establecen reglas de influencia funcional y morfológica en el espacio de acciones. El algoritmo CART (classification and regression tree) divide sucesivamente los datos continuos o discretos mediante particiones binarias y selecciona automáticamente la combinación con el índice de Gini más bajo:

$$Gini(A) = 1 - \sum_{i=1}^C p_i^2$$

donde A es el nodo, p_i la probabilidad de pertenecer a la categoría i y C el número de categorías.

2.2.2 Construcción de la red de evaluación a partir del grado de acoplamiento «función–morfología»

El objetivo del estudio es generar propuestas mesoscópicas en las que las funciones y las formas estén coordinadas; por ello, el criterio central de evaluación es el grado de acoplamiento entre ambos sistemas. Los modelos tradicionales de coordinación, basados en el coeficiente de acoplamiento y el índice de coordinación, se utilizan ampliamente para evaluar la relación entre dos sistemas [22-23], en particular cuando estos pueden representarse mediante variables numéricas.

Sin embargo, los sistemas funcional y morfológico poseen propiedades espaciales evidentes. Un único indicador numérico no puede reflejar las diferencias de acoplamiento en el territorio, y la puntuación manual es subjetiva y exige valorar un gran número de estados. Por tanto, la red de evaluación propuesta adapta el modelo de coordinación a las características espaciales de los elementos y establece un proceso inteligente compuesto por cuatro etapas: conversión de las propuestas a escala de grises, identificación de elementos acoplados, puntuación de las manzanas y cálculo del grado de coordinación.

① **Conversión a escala de grises.** Las propuestas funcionales y morfológicas se convierten en imágenes en escala de grises. En el sistema funcional, las categorías se jerarquizan según su importancia estructural ($B2 > A > B1 > G > R$); en el sistema morfológico, los valores de los indicadores se dividen en cinco niveles mediante el método de rupturas naturales.

② **Identificación de elementos acoplados.** A partir de reglas para reconocer puntos, líneas y superficies, los resultados en escala de grises se transforman automáticamente en elementos espaciales. Para los puntos, se calcula el valor medio de las manzanas próximas a cada intersección viaria y se utiliza como potencial; los N valores más altos se seleccionan como puntos funcionales o morfológicos. Para las líneas, se eligen las manzanas situadas a ambos lados de las vías principales y secundarias cuyos valores funcionales o morfológicos se encuentran en el 50 % superior; las N vías con mayor número de unidades se conservan como elementos lineales. Para las superficies, se seleccionan las manzanas situadas en el 75 % superior de los valores del sector.

③ **Puntuación de las manzanas.** Con el fin de transformar las diferencias espaciales en campos numéricos, cada manzana recibe una puntuación según su función en la composición de los elementos. Los puntos, que actúan como núcleos funcionales o grupos de hitos, poseen el mayor poder de irradiación e identificación; las líneas, constituidas por corredores económicos o visuales, ocupan una posición intermedia;

y las superficies de base presentan la capacidad de identificación más débil. Si una manzana participa en varios elementos, las puntuaciones se acumulan.

④ **Cálculo de la coordinación.** El modelo calcula el grado de coordinación entre función y forma de todas las manzanas en un estado determinado. El grado global del sector corresponde a la suma de los valores obtenidos para todas las unidades.

2.3 Módulo de iteración de las propuestas

El modo de acoplamiento representa el estado de interacción [24] y refleja la dirección de evolución de los sistemas después de su intercambio dinámico. En el diseño urbano inteligente, los distintos modos corresponden, por tanto, a trayectorias de iteración diferenciadas.

La comparación de las posiciones espaciales de los elementos funcionales y morfológicos —considerando principalmente los puntos y las líneas, ya que las superficies poseen menor capacidad de identificación— permite distinguir varias situaciones. Cuando ambos sistemas están completos, es decir, cuando pueden reconocerse sus elementos puntuales y lineales, puede producirse una superposición elevada, una coincidencia predominante de puntos, una coincidencia predominante de líneas, una superposición local o una ausencia casi total de coincidencia. Cuando solo uno de los sistemas es completo, aparece un modo de predominio funcional o morfológico. Cuando ambos son incompletos, se manifiesta una distribución dispersa.

De acuerdo con las clasificaciones habituales basadas en el grado de coordinación, los valores comprendidos entre el 80 % y el 100 % se consideran bien coordinados, mientras que los inferiores al 20 % representan un desarrollo desajustado [25-26]. Este estudio utiliza, por tanto, los umbrales del 80 % y el 20 % para distinguir ocho modos: acoplamiento elevado, concentración nuclear, desarrollo axial, acoplamiento moderado, desarrollo desajustado, predominio funcional, predominio morfológico y distribución dispersa (tabla 2).

Tabla 2. Ocho modos de acoplamiento entre función y morfología

Modo de acoplamiento	Integridad funcional	Integridad morfológica	Acoplamiento de puntos	Acoplamiento de líneas
Acoplamiento elevado	Completa	Completa	≥ 80 %	≥ 80 %
Concentración nuclear	Completa	Completa	≥ 80 %	< 80 %
Desarrollo axial	Completa	Completa	< 80 %	≥ 80 %
Acoplamiento moderado	Completa	Completa	20-80 %	20-80 %
Desarrollo desajustado	Completa	Completa	≤ 20 % o < 80 %	< 80 % o ≤ 20 %
Predominio funcional	Completa	Incompleta	—	—
Predominio morfológico	Incompleta	Completa	—	—
Distribución dispersa	Incompleta	Incompleta	—	—

De los ocho modos, se excluyen los tres con menor coordinación —desarrollo desajustado, distribución dispersa y acoplamiento moderado—. Los cinco restantes —acoplamiento elevado, concentración nuclear, desarrollo axial, predominio funcional y predominio morfológico— muestran un acoplamiento dinámico más razonable, representan distintas orientaciones espaciales y proporcionan a los diseñadores alternativas diversificadas para la iteración (fig. 3).

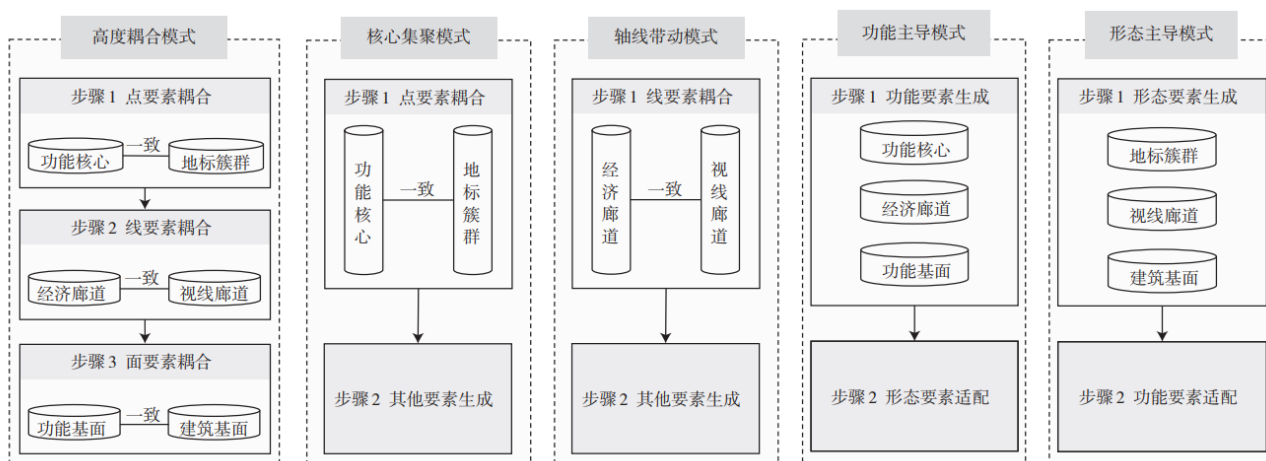


Figura 3. Esquema de las etapas de generación guiadas por diferentes modos de acoplamiento

2.4 Módulo de comparación y optimización

Dado que algunas demandas de diseño no pueden transformarse directamente en parámetros de control, se incorpora a las propuestas generadas un módulo de comparación y optimización persona-máquina, con el fin de producir soluciones aplicables en la práctica.

En primer lugar, se construye un radar de evaluación en cinco dimensiones orientado a la maximización del valor integral: economía, ecología, sociedad, paisaje y accesibilidad. La eficiencia económica se representa mediante las superficies de suelo B1 y B2 y el volumen construido; la eficiencia ecológica, mediante la proporción de terrenos G y E; la eficiencia social, mediante el porcentaje de construcción correspondiente a la categoría A; la eficiencia paisajística, mediante la visibilidad de los espacios verdes y los cuerpos de agua desde las manzanas, simulada mediante panoramas de 360°; y la accesibilidad, mediante la distancia mínima media desde las unidades residenciales hasta los equipamientos públicos próximos.

A partir de estos criterios, el ordenador calcula y etiqueta automáticamente los indicadores multidimensionales de un gran número de propuestas iniciales. El diseñador selecciona las alternativas que deben profundizarse mediante el radar y las optimiza a través de la interacción persona-máquina, considerando las demandas de los distintos actores. Finalmente, se obtiene un modelo vectorial y un conjunto de planos de diseño urbano a escala mesoscópica.

3 Verificación empírica: práctica de diseño urbano inteligente en un sector de muestra

3.1 Un caso representativo de «terreno relativamente libre»

La experimentación se realiza en un sector de la ciudad de Chuzhou. El área representa numerosas periferias urbanas con un grado de desarrollo todavía reducido, que en el contexto de las políticas actuales se han convertido en zonas prioritarias para desconcentrar las funciones de la ciudad antigua y ampliar la ciudad nueva. En estos sectores existen pocos elementos que deban conservarse y son menores las restricciones relacionadas con la complejidad de la propiedad o la protección histórica. Por ello, permiten materializar en mayor medida el esquema espacial del proyecto y ofrecen condiciones adecuadas para experimentar con el diseño urbano inteligente.

Esta exploración sobre un «terreno relativamente libre» pretende establecer en primer lugar el proceso básico de interacción dinámica inteligente entre función y morfología. Sobre esta base podrán realizarse posteriormente experimentos en contextos con mayores restricciones existentes, hasta conformar una metodología madura y aplicable a proyectos reales.

El uso actual del suelo está dominado por áreas agrícolas, forestales y aldeanas. Según la planificación superior, el sector debe transformarse en suelo de construcción urbana. Antes de iniciar el diseño inteligente, se construye una base digital, se evalúan los recursos existentes y se conservan los cursos de agua y espacios

verdes de alto valor ecológico, así como los terrenos residenciales y culturales con edificaciones de calidad aceptable.

El centro geométrico de cada manzana se utiliza como coordenada, generando 155 agentes espaciales. Los agentes cuyas funciones o características morfológicas deben mantenerse reciben una codificación one-hot [27], de modo que no se ejecute sobre ellos ninguna acción durante el proceso de iteración (fig. 4).

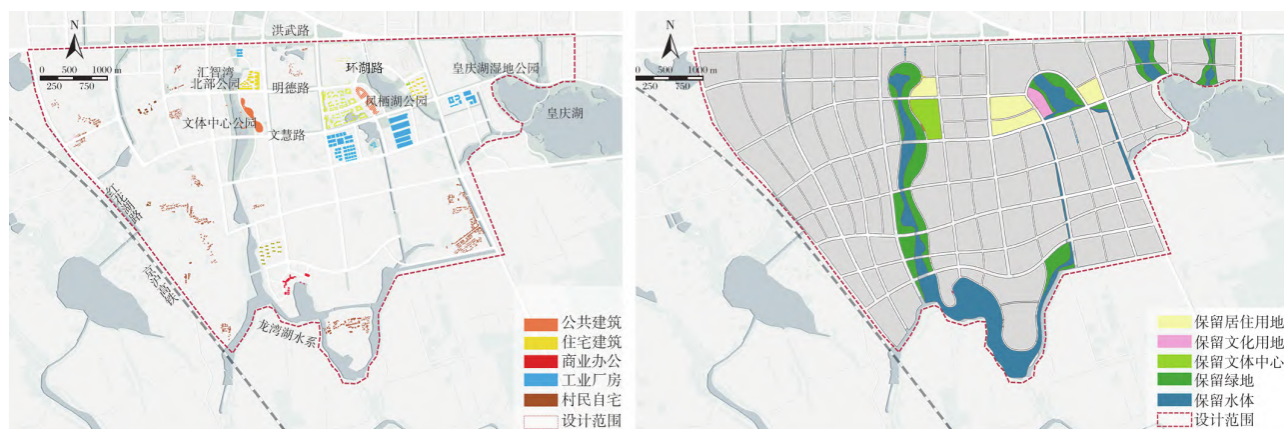


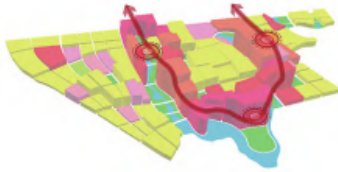
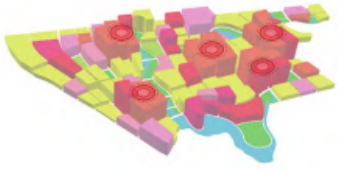
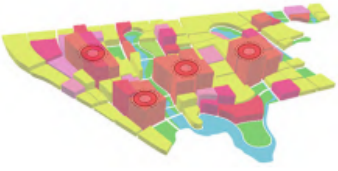
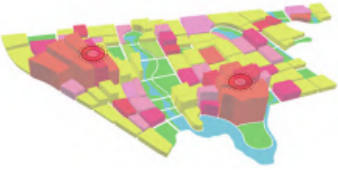
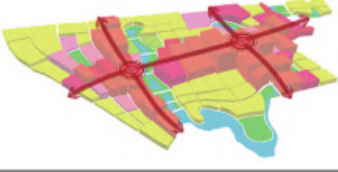
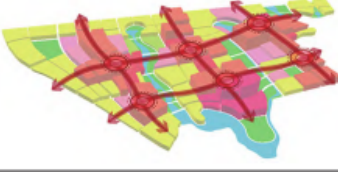
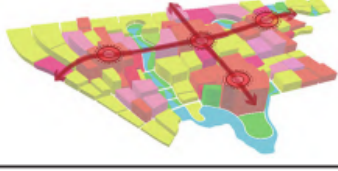
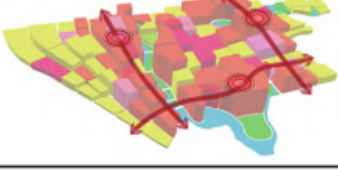
Figura 4. Condiciones existentes y base digital del sector de muestra

3.2 Resultados del diseño urbano inteligente basado en la interacción dinámica «función– morfología»

A partir de la vía mesoscópica propuesta se generan automáticamente quince alternativas correspondientes a los cinco modos de acoplamiento seleccionados (tabla 3).

Tabla 3. Alternativas de diseño urbano inteligente para el sector de muestra

Modo de acoplamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Acoplamiento elevado	A-1	A-2	A-3
Concentración nuclear	B-1	B-2	B-3
Desarrollo axial	C-1	C-2	C-3
Predominio funcional	D-1	D-2	D-3
Predominio morfológico	E-1	E-2	E-3

耦合模式	智能城市设计方案		
高度耦合模式	A-1	A-2	A-3
			
核心集聚模式	B-1	B-2	B-3
			
轴线带动模式	C-1	C-2	C-3
			
功能主导模式	D-1	D-2	D-3
			
形态主导模式	E-1	E-2	E-3
			

3.2.1 Generación de propuestas en el modo de acoplamiento elevado

El proceso de iteración incluye elementos puntuales y lineales. Las cinco intersecciones viarias que presentan los valores medios de gris más altos entre los agentes próximos se seleccionan como puntos acoplados, mientras que las tres vías principales y secundarias mejor clasificadas se consideran líneas acopladas.

La coincidencia espacial aumenta a medida que se incrementa el número de iteraciones. Los puntos alcanzan el beneficio óptimo después de aproximadamente 1.200 iteraciones y las líneas después de algo más de 500. A continuación se generan distintas combinaciones aleatorias por pares. Para obtener un resultado más sistemático, se eligen las tres combinaciones con la menor suma de distancias perpendiculares entre los puntos y las líneas vecinas, correspondientes a las alternativas A-1, A-2 y A-3.

3.2.2 Generación de propuestas en el modo de concentración nuclear

En este modo, la elevada concentración espacial de los factores de producción forma núcleos centrales. Los núcleos que se desarrollan primero impulsan las demás manzanas mediante los efectos de

desbordamiento del capital, el trabajo y otros recursos. La distribución de los núcleos funcionales y los grupos de hitos presenta un alto grado de coincidencia, maximizando el efecto de aglomeración.

La iteración de los puntos es semejante a la del modo de acoplamiento elevado y se estabiliza después de más de 1.200 ciclos. Se seleccionan tres alternativas con beneficios elevados y distinto número de nodos acoplados: B-1, B-2 y B-3. La variación en el número de nodos produce configuraciones espaciales muy diferentes; a medida que aumenta, la integridad de la estructura global tiende a debilitarse.

3.2.3 Generación de propuestas en el modo de desarrollo axial

El modo axial se apoya en la red de transporte para organizar manzanas con funciones más públicas y formas más emblemáticas. De este modo se configura una estructura lineal en la que los ejes impulsan el desarrollo del conjunto del sector.

Después de algo más de 500 iteraciones, los elementos lineales convergen gradualmente hacia propuestas con un elevado grado de acoplamiento. Se seleccionan las tres alternativas con mayor valor de la función de beneficio: C-1, C-2 y C-3. Los resultados muestran que las propuestas más eficaces suelen adoptar una estructura en cruz o alguna de sus variantes, y que el efecto de irradiación es mayor cuando el eje atraviesa la parte central del sector.

3.2.4 Generación de propuestas en el modo de predominio funcional

En el modo de predominio funcional, la morfología espacial aparece como un contenido adaptado a la distribución funcional, por lo que la racionalidad de la estructura funcional desempeña un papel decisivo. Con el fin de aprovechar la incertidumbre de la generación automática y estimular la inspiración del diseñador, no se imponen al inicio reglas rígidas de zonificación; el algoritmo de aprendizaje por refuerzo explora de manera autónoma las combinaciones posibles.

Durante las primeras iteraciones, los usos del suelo se distribuyen de forma dispersa y no constituyen un sistema funcional claramente identificable. Después de unas 1.000 iteraciones, las características de la distribución se vuelven progresivamente más nítidas y aparecen núcleos empresariales, centros de servicios públicos y corredores económicos. A continuación, un decisor espacial asocia los indicadores morfológicos correspondientes y produce las tres propuestas con mayor beneficio: D-1, D-2 y D-3.

En términos generales, cuando el número de elementos funcionales lineales supera tres, las formas generadas tienden a homogeneizarse. Aunque mantienen un buen acoplamiento con la función, su capacidad de identificación espacial resulta menor.

3.2.5 Generación de propuestas en el modo de predominio morfológico

Guiado por la red de política, este modo genera primero una propuesta morfológica y posteriormente asigna de forma inteligente las funciones a partir de correlaciones derivadas de la experiencia. A diferencia de la forma general suave y de las elevaciones localizadas propias de las propuestas funcionalmente dominantes, el predominio morfológico produce un mayor número de manzanas de gran altura con valor de hito. El intervalo de alturas se amplía hasta 0-250 m, formando una composición más rica y escalonada.

Después de unas 900 iteraciones, las pautas de variación morfológica se hacen reconocibles: aparecen grupos de hitos en altura y franjas continuas de edificación alta. A continuación se asignan automáticamente las funciones y se generan las tres alternativas con mayor beneficio morfológico: E-1, E-2 y E-3. Estas propuestas muestran una elevada mezcla funcional y no presentan la zonificación clara que caracteriza al modo de predominio funcional.

A partir del conjunto de propuestas, el radar de cinco dimensiones compara el rendimiento de las alternativas y de los distintos modos de acoplamiento (fig. 5). Se selecciona como propuesta inicial la alternativa E-3, correspondiente al predominio morfológico y dotada del mejor resultado integral. Después de varias rondas de retroalimentación y optimización persona-máquina, el proyecto final se organiza alrededor de un sistema hídrico en forma de «U», que actúa como estructura espacial. En torno a él se

sitúan funciones de servicio público y edificios emblemáticos, mientras varias ramas de desarrollo se extienden desde el eje principal.

El caso confirma la viabilidad y la capacidad de generalización del método inteligente a escala mesoscópica. Ante entornos urbanos complejos y diversos, puede proporcionar en poco tiempo propuestas espaciales más ricas y racionales. Además, los proyectos generados por los distintos modos no constituyen estados estáticos e independientes: pueden transformarse dinámicamente mediante el ajuste de parámetros, lo que mejora la adaptabilidad y la flexibilidad del diseño frente a demandas urbanas cambiantes.

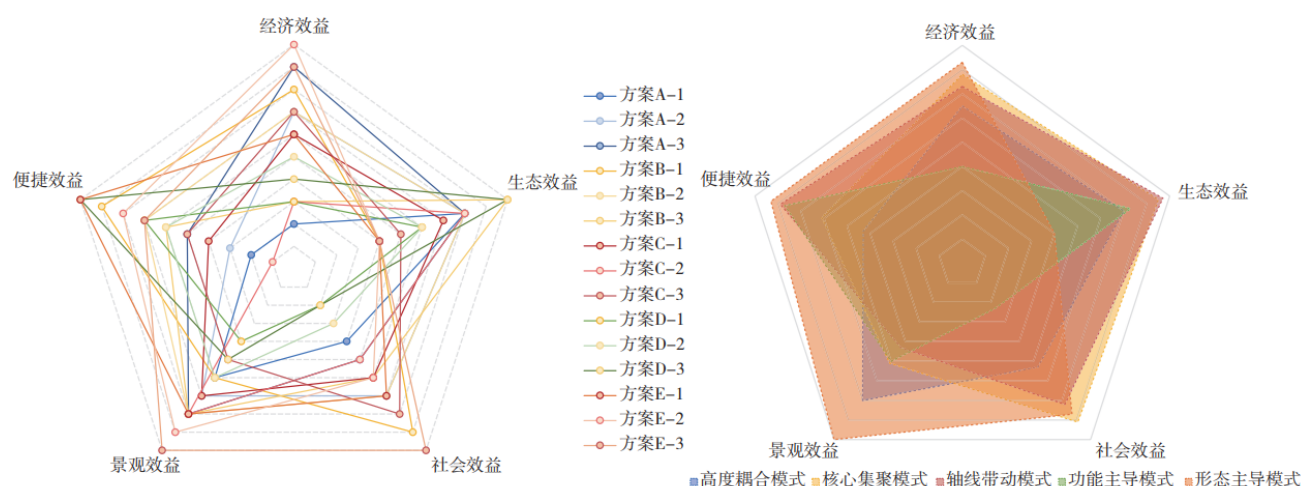


Figura 5. Diagramas radar de evaluación de las distintas alternativas y modos de acoplamiento

4 Conclusiones

A medida que evoluciona el complejo sistema espacial urbano, la interacción entre función y morfología a escala mesoscópica se vuelve cada vez más compleja. Desde la perspectiva de la interacción dinámica «función–morfología», este estudio construye un método inteligente de diseño urbano con alcance general mediante algoritmos de inteligencia artificial. A través de la interacción entre el diseñador y el sistema inteligente, el espacio pasa del desorden al orden y de un estado dinámico a otro relativamente estable. De este modo, se simula la evolución en la que los sistemas funcional y morfológico cooperan, compiten y se ajustan mutuamente, poniendo de manifiesto el carácter evolutivo del espacio urbano.

En el contexto de una transformación continua de las tecnologías emergentes, el diseño urbano digital basado en tecnologías inteligentes se encuentra en plena expansión. Ante el impacto de la reconfiguración de los modos de producción y de vida sobre el espacio urbano futuro, es necesario reconocer con mayor claridad el papel decisivo de las herramientas inteligentes. La integración creativa de la inteligencia humana y la capacidad de cálculo, con el fin de proyectar espacios urbanos de alta calidad en distintas escalas, dimensiones y escenarios, seguirá siendo previsiblemente una cuestión científica relevante durante mucho tiempo. El camino hacia un diseño urbano inteligente orientado al futuro apenas comienza.

Nota

① El aprendizaje por refuerzo (reinforcement learning, RL) es un método de aprendizaje automático en el que un agente obtiene «recompensas» mediante ensayo y error durante su interacción con un entorno. Sus componentes centrales son la red de política (policy network), la red crítica o de evaluación (critic network) y el proceso de decisión de Markov (Markov decision process, MDP). Las distintas acciones del agente generan señales de recompensa diferenciadas, que orientan su siguiente acción con el objetivo de maximizar el beneficio. A partir del aprendizaje de un solo agente se ha desarrollado el aprendizaje por refuerzo multiagente, en el que varios agentes colaboran para resolver tareas de optimización en espacios complejos, dinámicos y de alta dimensión.

Referencias

- [1] MINISTERIO DE VIVIENDA Y DESARROLLO URBANO-RURAL DE LA REPÚBLICA POPULAR CHINA. Reglamento sobre la gestión del diseño urbano [S]. 2017. [en chino]
- [2] TRANCIK R., GOODEY B., JIN Guangjun. Concepto y contenido del diseño urbano [J]. *New Architecture*, 1990(4): 76-77. [en chino]
- [3] WANG Jianguo. Cuatro generaciones de paradigmas del desarrollo del diseño urbano desde la perspectiva de la planificación racional [J]. *City Planning Review*, 2018, 42(1): 9-19. [en chino]
- [4] BIAN Hongqin, CHEN Nan. Cuarenta años de directrices de diseño urbano a escala mesoscópica: retrospectiva, reflexión y perspectivas [J]. *Planners*, 2020, 36(15): 55-60. [en chino]
- [5] SUN Yimin. Construcción científica de grandes proyectos urbanos a escala mesoscópica: reflexiones sobre el sistema del diseñador jefe [J]. *Contemporary Architecture*, 2022(5): 19-23. [en chino]
- [6] YANG Junyan, LU Xiaobo. Morfología de escala intermedia en el diseño urbano: exploración del proyecto «Nueve ejes de Tongjin» en Nantong [J]. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 106-116. [en chino]
- [7] ZHANG Li, DENG Huishu, MEI Xiaohan, et al. Ingeniería urbana de factores humanos: una ciencia del diseño de la calidad de la experiencia espacial [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(16): 1744-1756. [en chino]
- [8] WU Zhiqiang, HUANG Xiaochun, LI Dong, et al. Mesa redonda académica sobre «la influencia de la inteligencia artificial en la planificación urbana» [J]. *Urban Planning Forum*, 2018(5): 1-10. [en chino]
- [9] YANG Chao. Principios de diseño urbano de las nuevas ciudades desde el «infraestructuralismo»: integración estructural de la heteroorganización y la autoorganización [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 45-53. [en chino]
- [10] YANG Junyan, ZHANG Zhonghu, SHI Yi. Plataforma digital de participación pública en el diseño urbano orientado a la regeneración: el caso del sector de Yuejianglou en Nanjing [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(3): 74-81. [en chino]
- [11] SHAO Dian, YANG Junyan. Análisis de la superposición de sistemas multiestructurales de la morfología espacial urbana [J]. *Chinese Famous Cities*, 2023, 37(1): 71-78. [en chino]
- [12] WANG Lin, TIAN Jian, XU Xiaonan, et al. Diferenciación espacial y acoplamiento de los asentamientos rurales a escala de condado desde la relación morfología–función: el caso del condado de Shan, en el suroeste de Shandong [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(9): 1730-1743. [en chino]
- [13] YANG Tao, TIAN Ying, XU Yanjie. Planificación y gobernanza generativas interactivas habilitadas por gemelos digitales [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2023(5): 4-10. [en chino]
- [14] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. Construcción de un modelo teórico de diseño urbano asistido por AIGC [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(2): 12-18. [en chino]
- [15] ZHENG Degao, ZHU Wenjuan, LIN Chenhui, et al. Estudio de las áreas prioritarias y potenciales de Shanghái desde la perspectiva de la optimización de la estructura funcional [J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 65-71. [en chino]
- [16] YANG Chao, LI Qiang. Lógica formal estructurada del diseño urbano: ampliación de la teoría del análisis del diseño [J]. *Urban Development Studies*, 2024, 31(1): 31-41. [en chino]
- [17] GUO Y., HU X., TANG J. Structural landmark salience computation in compact urban districts with 3D node-landmark grid analysis model: a case study on two sample districts in Changsha, China [J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 1024.
- [18] HU Xinyu. Estudio cuantitativo del espacio y las actividades de las áreas centrales con estructura axial y nuclear en las megaciudades asiáticas [D]. Universidad del Sureste, 2016. [en chino]

- [19] HE Yong, CHEN Yufan, ZHAO Jing. Transformación funcional y evolución morfológica de los asentamientos rurales periurbanos en las regiones económicamente desarrolladas de China [J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2023, 38(5): 17-23. [en chino]
- [20] LI J. W., ZHOU T. Multiagent deep meta reinforcement learning for sea computing-based energy management of interconnected grids considering renewable energy sources in sustainable cities [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104917.
- [21] SHAO Dian, YANG Junyan, SHI Beixiang, et al. Del esquema de diseño al sistema de control: un método de traducción detallada del diseño urbano a escala de manzana [J]. *City Planning Review*, 2022, 46(10): 56-71. [en chino]
- [22] ZHANG Xuchen, ZHAO Min. Orígenes de los «estudios de acoplamiento» en la planificación urbana y análisis de sus errores habituales [J]. *City Planning Review*, 2022, 46(6): 37-47. [en chino]
- [23] ZHANG L., WU M., BAI W., et al. Measuring coupling coordination between urban economic development and air quality based on the fuzzy BWM and improved CCD model [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103283.
- [24] ZHANG Yang, HE Yi. De la separación a la integración: lógica de construcción de un sistema de evaluación diagnóstica de los centros históricos basada en la teoría del acoplamiento sistémico [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(3): 82-90. [en chino]
- [25] XING Zhong, ZHU Jiayi. Evaluación de la equidad de los espacios verdes basada en la teoría del desarrollo coordinado por acoplamiento [J]. *City Planning Review*, 2017, 41(11): 89-96. [en chino]
- [26] ZHAO Xuechun, JU Chunyan. Relación de coordinación entre los parques y espacios verdes y el espacio funcional urbano, y factores de influencia: el caso de Urumqi [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(5): 898-908. [en chino]
- [27] YAO Jiawei, HUANG Chenyu, FU Bin, et al. Investigación y práctica del diseño guiado por el rendimiento del entorno eólico con apoyo del aprendizaje profundo por refuerzo [J]. *Architectural Journal*, 2022(S1): 31-38. [en chino]

Revisión recibida: enero de 2025.

Traducción asistida por IA