

Trajetórias no Morfoespaço: O que distingue cidades de outras configurações?

Vinicius M. Netto^a, Caio Cacholas^b, Fabiano Ribeiro^c, Dries Daems^d, Daniel Lenz^e e Howard Davis^f

^a Universidade do Porto, Centro de Investigação em Território, Transporte e Meio Ambiente, Porto, Portugal.

E-mail: vmnetto@fe.up.pt

^b Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Niterói, RJ, Brasil.

E-mail: caiocacholas@id.uff.br

^c Universidade Federal de Lavras, Departamento de Física, Lavras, MG, Brasil.

E-mail: fribeiro@dfi.ufla.br

^d Vrije Universiteit Amsterdam, Departamento de Arqueologia, Amsterdam, Holanda.

E-mail: d.daems@vu.nl

^e Universidade Federal do Ceará, Instituto de Arquitetura, Urbanismo e Design, Fortaleza, CE, Brasil.

E-mail: daniel.lenz@arquitetura.ufc.br

^f University of Oregon, Departamento de Arquitetura, Eugene, EUA.

E-mail: hdavis@uoregon.edu

Submetido em 20 de maio de 2025. Aceito em 30 de setembro de 2025.

<https://doi.org/10.47235/rmu.v13i2.489>

Resumo. *O que distingue as cidades de outros assentamentos humanos? Este artigo investiga a criação das cidades através de uma abordagem que integra a teoria urbana e o conceito biológico de morfoespaço — o espaço das configurações possíveis. A morfogênese é conceituada como trajetórias do morfoespaço, onde configurações seriam experimentadas e progressivamente selecionadas com base em sua aptidão em dar suporte às interações de agentes. A hipótese é a de que as cidades emergiram como soluções a forças sociais e materiais potencialmente conflitantes: a necessidade crescente de densidade e mobilidade — mediadas pela emergência de propriedades como a permeabilidade e a informação espacial. Introduzimos uma nova medida de permeabilidade baseada na relação entre áreas construídas e livres e a profundidade de isovistas — e integramos essas propriedades na forma de um “cubo do morfoespaço” como espaço das configurações possíveis. Aplicamos o método a dezenas de configurações bidimensionais teóricas, assentamentos não urbanos e protourbanos e cidades contemporâneas. O morfoespaço proposto é capaz de distinguir entre essas configurações e localizar uma região específica para as cidades, as quais exibem assinaturas particulares de densidade, permeabilidade e informação. Esses resultados sustentam a proposição de que as cidades evoluem como soluções que intensificam ao mesmo tempo em que equilibram propriedades espaciais fundamentais, permitindo-lhes assim suportar funções sociais complexas.*

Palavras-chave. *morfogênese urbana, morfoespaço, crescimento em busca de estrutura, divisão do trabalho*

Introdução

As cidades estão por toda parte — uma solução espacial extraordinária na qual cerca de 3 % do território global abriga 57 % da população mundial. Nos países desenvolvidos, mais de 80 % dos habitantes vivem em áreas urbanas (UNCTAD, 2023). Mas como chegamos às cidades? Que forças sociais e materiais levaram sociedades distintas, em tempos e regiões diferentes, a produzir independentemente as cidades como solução espacial para a vida coletiva? As cidades são universais ou dependentes do contexto? Essas questões tratam da criação das cidades como resposta a sociedades cada vez mais complexas e, possivelmente, parte de sua própria emergência. Embora culturas não urbanas de caçadores-coletores ainda existam, a maioria das demais trilhou o caminho da urbanização, produzindo espacialidades funcionais complexas às quais chamamos “cidades”. Podemos definir provisoriamente uma cidade como um assentamento densamente povoado e espacialmente estruturado, caracterizado por alta complexidade social, especialização econômica e diversidade funcional. Ela sustenta população concentrada por meio de sistemas interligados de infraestrutura, governança e serviços, possibilitando atividades coletivas, produção e troca. A literatura aponta como fatores centrais defesa, hierarquias sociais, escala populacional, produção de alimentos, comercialização e especialização do trabalho (Cowgill 2004; Creekmore & Fisher 2014). Nosso enfoque recai sobre forças sociais e materiais específicas que impulsionaram a urbanização, desencadeadas pelo aumento da complexidade da divisão do trabalho.

Ao reconhecermos as cidades como soluções sociosaciais para padrões de vida coletiva em transformação, surgem novas perguntas: o que distingue cidades de assentamentos não urbanos em termos de forma e função? Por que surgiram estruturas comuns e, ao mesmo tempo, diversidade de formas? Essas questões são clássicas nos estudos de morfogênese urbana (e.g., Alexander 1964; Hillier & Hanson 1984; Davis 2006), um ramo da morfologia urbana. “Morfogênese” vem da biologia, onde descreve o processo pelo qual células, tecidos e organismos adquirem dimensão e forma (Gilmour et al., 2017). Nos

estudos urbanos, refere-se à criação das espacialidades específicas das cidades (cf. Conzen 1988). Uma forma de abordar o tema é recorrer a outro conceito oriundo da biologia — o “morfoespaço” (Raup 1966), entendido como o espaço de todas as configurações biológicas possíveis. Esse conceito é útil no contexto urbano por vários motivos: permite pensar contrafactualmente sobre as possibilidades de forma dos assentamentos humanos, sobre quais percursos morfológicos já foram explorados pelas culturas espaciais e sobre que possibilidades existem, mas ainda não foram experimentadas — e por que não o foram.

O morfoespaço permite analisar a passagem do conjunto de todas as formas possíveis em um espaço abstrato bidimensional para as formas efetivamente exploradas pelos assentamentos humanos e, depois, para as formas tipicamente urbanas. Essa abordagem exige examinar características da morfologia e da morfogênese sob perspectivas evolutiva e estrutural, inclusive como a morfologia urbana se diferencia de outros tipos de assentamento. A economia espacial trata desse ponto ao ver a aglomeração como solução (e.g., Fujita et al., 1999). Contudo, aglomeração é uma propriedade geral que pode ser atingida por um número virtualmente infinito de arranjos espaciais. O morfoespaço mostra que muitas formas potencialmente alcançáveis simplesmente não funcionariam como cidades, pois estas tendem a exibir propriedades espaciais específicas. Tais propriedades provavelmente definem a posição das cidades no morfoespaço. Além de gerar densidade por aglomeração, as cidades precisam permitir que as pessoas se movam e naveguem nos espaços para interagir. O morfoespaço deve materializar propriedades espaciais distintivas e relacionadas que caracterizem e diferenciem a vasta gama de configurações, idealmente abrangendo de todas as formas possíveis aos assentamentos não urbanos e urbanos.

Concentraremos a análise em três propriedades fundamentais que as cidades teriam surgido para equilibrar: densidade, permeabilidade e informação na forma urbana. Argumentamos que essas três propriedades bastam para descrever as diferenças entre qualquer configuração, incluindo assentamentos urbanos ou não.

Desenvolvemos medidas para elas e as aplicamos a uma amostra de configurações, desde distribuições teóricas a assentamentos humanos reais, proto-cidades e cidades consolidadas. Essas propriedades delineiam um morfoespaço para os assentamentos humanos, identificando agrupamentos morfológicos que emergem de diferentes conjuntos de parâmetros. À semelhança do conceito na biologia, o morfoespaço nos permitirá visualizar o espaço que as cidades tendem a ocupar, as posições típicas dos assentamentos não urbanos e os espaços aparentemente inviáveis para a ocupação humana.

Em síntese, o artigo apresenta um arcabouço para decifrar a morfogênese urbana por meio do morfoespaço. Primeiro, considera brevemente a criação das cidades como resposta à crescente complexidade funcional de certas sociedades. Segundo, desenvolve um método para analisar condições espaciais que favorecem o surgimento de formas urbanas. Ao sintetizar contribuições da teoria urbana, biologia e arqueologia, buscamos elucidar como as cidades evoluíram, percorrendo trajetórias que vão do espaço de todas as configurações espaciais possíveis às configurações encontradas em assentamentos humanos e, por fim, nas formações urbanas. Por último, discutimos as implicações dessa abordagem para a compreensão da morfogênese urbana. Iniciamos, portanto, com uma breve revisão das abordagens existentes sobre o tema.

Revisão da literatura: abordagens da morfogênese urbana

As cidades surgem como soluções espaciais adaptativas que facilitam interação social, comércio, desenvolvimento cultural e governança. Frequentemente atuam como centros de inovação, alocação de recursos e tomada de decisões. Essa definição reflete atributos-chave tipicamente presentes nos ambientes urbanos:

- Densidade e escala – maior densidade populacional e concentração espacial em relação às áreas vizinhas.
- Complexidade social – estruturas e redes sociais diversas, muitas vezes associadas a organizações hierárquicas (Daems, 2021).

- Especialização econômica – divisão do trabalho e funções além da subsistência, fomentando mercados e economias complexas.
- Diversidade funcional – conjunto de usos (residencial, comercial, administrativo, recreativo) que sustentam a vida coletiva.
- Infraestrutura e governança – sistemas organizados de vias, abastecimento de água, saneamento, serviços públicos e órgãos de gestão que administram recursos e necessidades populacionais.

O surgimento de cidades em diferentes sociedades e culturas suscita questões fundamentais sobre por que e como os assentamentos urbanos tomaram forma de maneira independente em várias regiões e momentos históricos. As cidades seriam uma solução espacial para acomodar padrões mutáveis de vida coletiva? Quais condições sociais e espaciais demandaram sua emergência? O que diferencia as cidades de outros assentamentos humanos? Compreender os fatores que impulsionaram a formação das cidades exige analisar as condições que possibilitaram os primeiros núcleos urbanos — do aumento populacional às inovações em produção de alimentos, comércio, defesa e governança. Esta seção explora as forças sociais e materiais que influenciaram a urbanização inicial, examinando se as cidades surgiram principalmente como resposta funcional a necessidades sociais complexas ou como subproduto de fatores únicos e contextuais. Diversas razões para a criação das cidades têm sido apontadas:

- Defesa e proteção – centros fortificados onde as pessoas podiam se abrigar de ameaças externas, permitindo defesa coletiva (Lambert, 2002; LeBlanc, 1999).
- Poder e hierarquias sociais – concentração de autoridade e estabelecimento de hierarquias, com governança centralizada para gerir recursos, aplicar leis e manter a ordem (Ur, 2014; Wright & Johnson, 1975; Goulder, 2010).
- Crescimento populacional – aumentos demográficos exigiram novas formas de organização e infraestrutura para sustentar elevados adensamentos (Boyd & Richerson, 2005; Smith, 2019; 2023;

Smith & Lobo, 2019).

- Ampliação da produção de alimentos – localização próxima a terras férteis ou rotas de comércio favoreceu agricultura organizada e estocagem, sustentando populações maiores (Jacobs, 1969; Adams, 1981; Goulder, 2010).
- Comercialização – polos de troca onde mercados e mercadores podiam operar eficientemente, difundindo bens e ideias (Trigger, 1972; Bairoch, 1991).
- Especialização do trabalho – divisão complexa de tarefas elevou produtividade, interdependência e inovação, fomentando a urbanização (Fisher & Creekmore, 2014; Southall, 1973; Trigger, 1972; Patterson, 2005).

Esses fatores, entre outros, podem ter se combinado para criar condições favoráveis às cidades, reforçando a urbanização de modos únicos, porém interconectados. Examinaremos mais de perto a relação entre especialização do trabalho e urbanização, à luz da crescente complexidade da cooperação e da divisão do trabalho (Cooper & West, 2018; Cooper et al., 2021) e do aumento da diversidade funcional em economias urbanizantes (Trigger, 1972; Hanson et al., 2017). Evidências dessa relação são empiricamente desafiadoras, mas estudos sobre cidades romanas antigas indicam correlação entre divisão do trabalho, especialização e diversidade funcional (Kaše et al., 2022; Hanson et al., 2017). Hipotetizamos vetores sociais e condições materiais da divisão do trabalho para a emergência histórica das cidades:

- Maior interação e interdependência entre especialistas (vetor social) – a especialização cria redes sociais em que indivíduos dependem mutuamente de habilidades alheias, intensificando trocas e colaboração (Jacobs, 1969; Fujita et al., 1999; Bettencourt et al., 2014; Ortman et al., 2014; Smith, 2019).
- Necessidade de reduzir distâncias entre especialistas (condição material) – proximidade diminui custos de transação e agiliza fluxos de bens e informações; cidades cumprem esse papel ao concentrar pessoas e recursos (Storper & Venables, 2004).

- Aumento da densidade (resposta material à interação crescente) – quanto maior a escala populacional e a divisão do trabalho, maior o adensamento necessário para sustentar redes de agentes interdependentes (Fletcher, 2007; Glaeser, 2011; Ribeiro et al., 2024).
- Mobilidade para especialistas interdependentes (resposta funcional) – a separação entre locais de residência e trabalho exige sistemas permeáveis de bairros, vias e redes que viabilizem deslocamentos eficientes de pessoas, bens e informação.

Podemos resumir essas forças sociais e exigências materiais em sociedades com crescente divisão de trabalho e diversidade funcional:

- *Interações sociais* em intensificação;
- *Densidade* como meio de generalizar a *proximidade* entre especialistas;
- *Mobilidade*, dependente de *permeabilidade* espacial nos assentamentos.

Essas sociedades demandam configurações que conciliem proximidade (densidade) e mobilidade, superando barreiras físicas erguidas pelas construções. Quando ambas aumentam, surge conflito potencial (Figura 1). Como resolver espacialmente essas forças coexistentes?

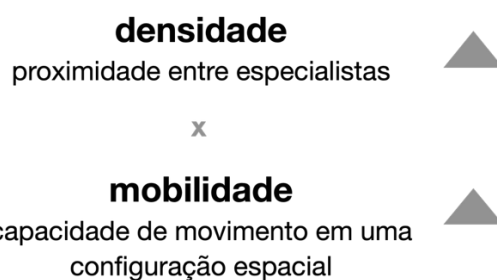


Figura 1. Forças sociais e condições materiais: em cenários onde densidade e mobilidade tendem a crescer — como em populações de especialistas interdependentes — essas exigências podem entrar em conflito (fonte: elaborada pelos autores)

Morfogênese como trajetória no morfoespaço: da totalidade das formas à forma urbana

Diversas culturas espaciais resolveram o conflito entre a necessidade crescente de densidade e a necessidade igualmente crescente de mobilidade por meio de soluções

morfológicas incrivelmente variadas. Examinar essas soluções ajuda a identificar propriedades, entidades e inovações espaciais que expressam e atendem a tais exigências sociais e materiais, caracterizam as cidades e distinguem-nas de outros assentamentos humanos. Antes de mais nada, é preciso reconhecer a diversidade de formas de

assentamento (Figura 2). Como surgiu tamanha diversidade? Assentamentos tão distintos podem sustentar modos complexos de vida coletiva? A complexidade e a tecnologia das sociedades caçadoras-coletoras foram amplamente estudadas (Hoffecker & Hoffecker, 2018 – veja assentamentos (a) e (b) na Figura 2).

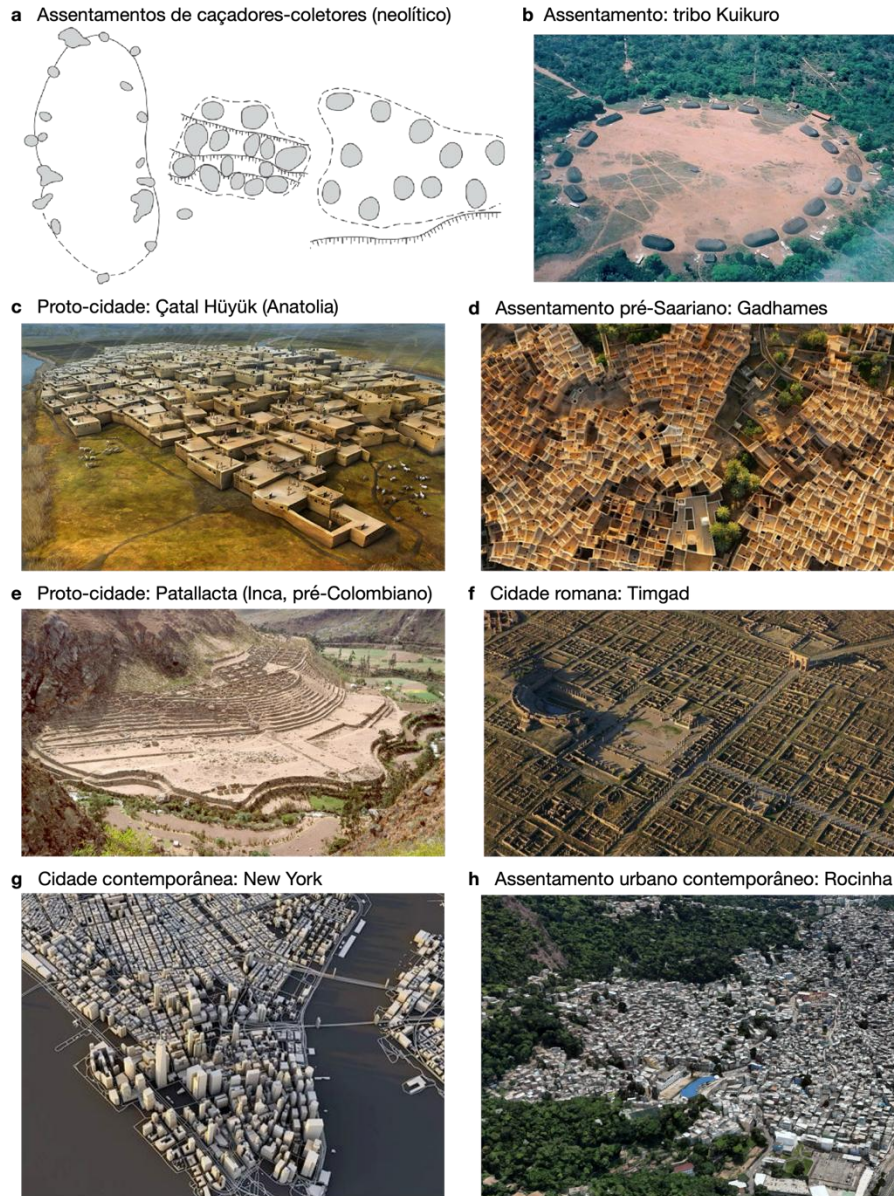


Figura 2. Diversidade espacial dos assentamentos humanos: (a) Kostienki I; cabanas neolíticas sem cerâmica em Nahal Oren (Israel, ~8000-6000 a.C.) e Çayönü (Anatolia, ~8000-6000 a.C.). (b) Aldeia de caçadores e coletores da tribo Kuikuro, Alto Xingu (Amazônia). (c) Çatal Hüyük (Turquia, ~7500-6400 a.C.). (d) Ghadames, oásis pré-romano (Líbia, ~4000 a.C.). (e) Patallacta, sociedade inca (Peru, ~800 d.C.). (f) Timgad (Argélia, 100 d.C.). (g) Manhattan, Nova York. (h) Rocinha, Rio de Janeiro (fonte: diversas).

Essas sociedades apresentam características fundamentais de organização social, alocação de recursos e estratégias de sobrevivência (Solich & Bradtmöller, 2017). A divisão do

trabalho é pouco definida: papéis variam conforme o contexto, e tarefas como caça, rastreamento, confecção de ferramentas, construção de abrigos, coleta de plantas,

processamento de alimentos e cuidado infantil costumam ser distribuídas por gênero e idade, exigindo coordenação coletiva. Indivíduos alternam funções conforme a necessidade, condições ambientais ou habilidades pessoais, acumulando competências variadas em vez de especializações rígidas. Essa adaptabilidade evita especialização estrita — essencial em ambientes de recursos imprevisíveis, onde uma divisão fixa poderia reduzir a resiliência do grupo. Já a alta densidade populacional, associada a especialização e interdependência crescentes, é difícil de alcançar em disposições espaciais com baixa edificação e

grandes distâncias entre unidades, típicas desses contextos.

Embora a densidade seja uma propriedade que pode surgir em múltiplas configurações, o que distingue espacialmente assentamentos urbanos e não urbanos? O morfoespaço ajuda a esclarecer. Análogo ao espaço de fases em física, morfoespaço é “o espaço de todas as configurações possíveis”; Raup (1966) o aplicou para explicar variações em conchas de gastrópodes. Na Figura 3, apenas as regiões A, B, C e D são ocupadas por espécies reais; as demais correspondem a formas possíveis que não ocorrem na natureza.

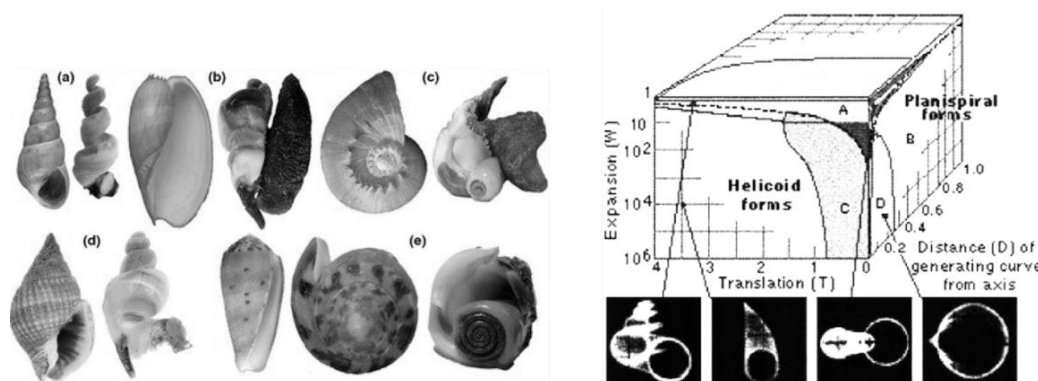


Figura 3. Morfoespaço de conchas de gastrópodes (fonte: Raupp, 1966)

E qual seria o morfoespaço dos assentamentos humanos? Ele deveria mapear todas as configurações possíveis — de acampamentos de caçadores-coletores a cidades — e permitir identificar diferenças entre elas. Contudo, imaginar o morfoespaço como infinito é desafiador. Um conceito útil é a ergodicidade, cara ao estudo de sistemas dinâmicos: em regime ergódico, um sistema visita todas as combinações de seus elementos. A hipótese ergódica pressupõe que, com tempo suficiente, todas as configurações acessíveis são exploradas com igual probabilidade — como partículas de gás ocupando todas as posições e velocidades compatíveis com energia e volume. Com a evolução do gás, a entropia cresce e a distribuição tende ao máximo de aleatoriedade. Esse princípio ajuda a entender fenômenos evolutivos, embora um comportamento totalmente ergódico seja inviável acima da escala molecular (Kaufman, 2000).

Na prática, a morfogênese espacial não é ergódica. Sistemas construídos demandam grande esforço e recursos, possuem rigidez e permanência e seguem trajetórias históricas

dependentes do caminho (Netto, 2017). Humanos podem imaginar e experimentar muitas configurações, mas não todas — e certamente não com igual probabilidade. No máximo, exploram possibilidades de forma quasi-ergódica, buscando arranjos adequados ao seu contexto.

Podemos distinguir três domínios concêntricos:

- Morfoespaço 1 – todas as configurações bidimensionais possíveis;
- Morfoespaço 2 – subconjunto capaz de sustentar a vida coletiva (assentamentos humanos);
- Morfoespaço 3 – subconjunto apto a sociedades em urbanização a partir de divisões do trabalho crescentes (assentamentos urbanos).

Propomos entender a evolução da forma como trajetória que percorre esses morfoespaços. É o que Alexander (2003) chamou de “passeio no espaço de configurações”: como se dá a redução do morfoespaço das configurações possíveis ao morfoespaço das configurações *urbanas* possíveis? (Figura 4).

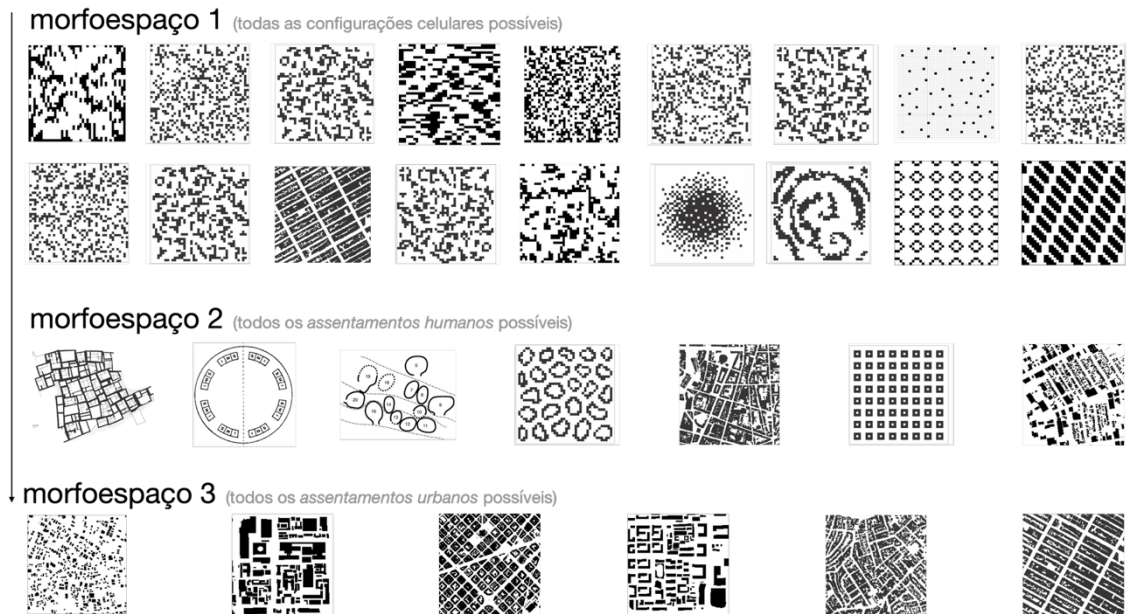


Figura 4. Caminho no espaço de configurações: transição do morfoespaço de todas as configurações celulares binárias e bidimensionais possíveis (1) ao morfoespaço das configurações que suportam assentamentos *humanos* (2) e ao morfoespaço das configurações que suportam assentamentos *urbanos* (3) (fonte: elaborada pelos autores)

O que guia essa trajetória? Há seleção feita pelos construtores originais? Por tentativa e erro? Quais regras — conscientes ou não — orientam a escolha de formas? Que características espaciais permitem que um arranjo se torne cidade? Processos de fit-misfit (Alexander, 1964) — adequação entre interação e forma — levam à seleção de configurações que conciliam proximidade (densidade) e mobilidade, superando as barreiras erguidas pelos edifícios. A tensão densidade-mobilidade é um caso particular do desafio maior de adequar forma e interação.

Aglomeração e *densidade* são vitais para ampliar escala e diversidade funcional (Jacobs, 1969; Fujita et al., 1999), mas não bastam. É preciso associá-las à *permeabilidade*, condição espacial que garante mobilidade e interação. Permeabilidade não se restringe a espaços abertos ao redor dos edifícios; deve estender-se por todo o assentamento, ligando setores distantes. Propomos que densidade e permeabilidade podem ser alcançadas simultaneamente por estruturas capazes de sustentar adensamento e, ao mesmo tempo, permitir conectividade generalizada entre as partes da cidade.

Método: morfogênese como caminho para a estrutura

Ao longo da história urbana — de proto-cidades neolíticas como Sha'ar HaGolan (ca. 6400–6000 a.C.) no Vale da Jordânia (Garfinkel, 2006) a Patallacta, assentamento inca pré-colombiano (800 d.C.), Timgad, cidade romana na atual Argélia (100 d.C.), e metrópoles contemporâneas (Figura 3) — observam-se características comuns em meio à diversidade de formas. Apesar das variações, esses tecidos exibem sistematicamente aglomerados de edifícios organizados em quarteirões de múltiplos formatos e tamanhos, conectados por redes de espaços abertos ou ruas. O que explica tanto essa estrutura compartilhada quanto a diversidade formal? A perspectiva do morfoespaço sugere que as diferentes culturas espaciais exploraram, naturalmente, uma gama virtualmente ilimitada de possibilidades, mas sempre condicionadas por fatores materiais, sociais e contextuais. O primeiro desafio, portanto, é entender o que essas culturas urbanizantes têm em comum. Argumentamos que todas moldam a aglomeração por meio de dois elementos morfológicos básicos: sistemas de quarteirões e redes de ruas.

Encaramos a morfogênese como uma trajetória através de morfoespaços. [+]

Uma forma de compreender a formação de estruturas em assentamentos em expansão recorre aos conceitos de entropia e informação. Distribuições espaciais têm graus variáveis de aleatoriedade e ordem, quantificáveis por medidas como entropia. Na física (entropias de Boltzmann e Gibbs) e na

teoria da informação (entropia de Shannon), entropia corresponde, em essência, à probabilidade: quanto mais uniformemente distribuídos os eventos (posição, frequência), maior a incerteza e a aleatoriedade. Medindo-a, avaliamos a probabilidade de uma configuração global ou a distribuição de eventos (por exemplo, células) num arranjo espacial (Netto et al., 2025) (Figura 5).

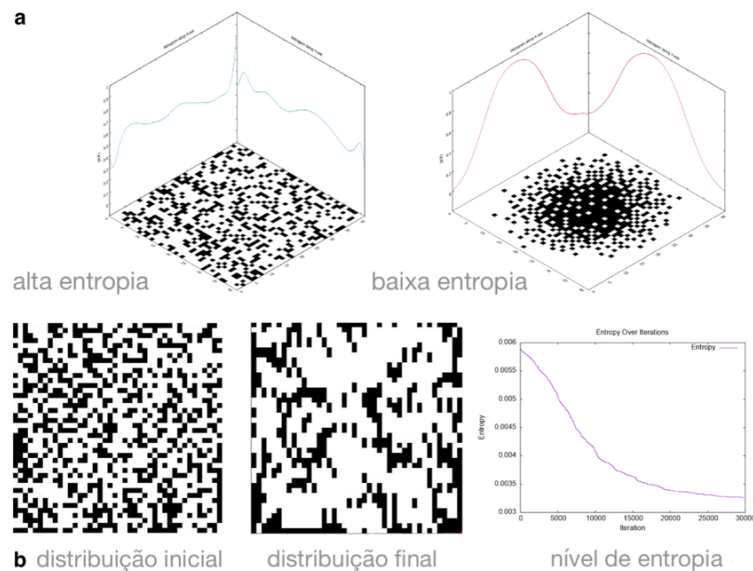


Figura 5. (a) Duas distribuições celulares: à esquerda, distribuição aleatória de alta entropia (curvas azuis), na qual é difícil prever onde surgirá a próxima célula; à direita, distribuição de baixa entropia, com células agrupadas e densidade decrescente à medida que cresce a distância ao centro (curvas vermelhas prevendo posições futuras). (b) Simulação de distribuição cuja entropia diminui ao longo do tempo: apesar da ordem crescente, o resultado final não atinge estrutura visível nem se assemelha a um assentamento urbano (fonte: Netto et al., 2025)

Distribuições com correlações internas elevam a frequência de certas posições (por exemplo, mais células alinhadas na fase final da Figura 6b). Entretanto, nossos experimentos computacionais mostram que reduzir aleatoriedade não basta para obter cidades: até distribuições de baixa entropia podem divergir muito dos padrões urbanos. Além disso, sociedades urbanizantes não percorrem grande número de estados possíveis; a probabilidade de visitar certas configurações é desigual. Muitas apresentam entropia alta demais para suprir interação social intensa e mobilidade. Portanto, tais sociedades procuram configurações raras que conciliem densidade, contiguidade e permeabilidade — condições para algo que se aproxime de uma cidade. A formação de microestruturas em anel (quarteirões) é altamente improvável e exige seleção: configurações densas e desordenadas prejudicam o livre deslocamento.

Em Shannon (1948), “surpresa” equivale a informação. Na navegação espacial, humanos buscam correlações, alinhamentos e pistas visuais, reconhecendo regularidades que ancoram sistemas cognitivos (McNamara et al., 2003; Ekstrom et al., 2019). Nossa abordagem aproxima-se da visão de informação como estruturas organizadas na física (Davies, 2015; Hidalgo, 2015). Mas reduzir entropia não basta: podemos ter baixa entropia com baixa permeabilidade ou densidade inadequada. Permeabilidade isolada tampouco resolve: pode haver rede permeável sem macroestrutura coerente. Sociedades com divisão do trabalho avançada exigem densidade, permeabilidade e baixa entropia — isto é, geração de estruturas que conectem escalas locais e globais. Em suma, precisam aumentar a informação juntamente com densidade e permeabilidade. A informação funciona simultaneamente como componente intrínseco dos sistemas e

ferramenta analítica para compreendê-los. Elevar a informação indica presença de regularidades que se traduzem em estruturas. Estruturas que interessam a agentes em movimento permitem densidade e mobilidade via permeabilidade entre edifícios. A combinação de informação e permeabilidade — continuidade entre células de espaço aberto — liga a microestrutura do quarteirão a correlações de longa distância no macro-sistema de quarteirões e redes viárias, possibilitando mobilidade profunda no conjunto urbano. Informação e permeabilidade são, portanto, portas de entrada para a estrutura.

Medição

Selecionamos métricas específicas para estimar densidade, permeabilidade e informação em distribuições celulares, tratadas como dimensões do morfoespaço.

Densidade: Usamos a medida padrão em morfologia urbana: a razão entre a área edificada e a área total do assentamento (ou da amostra analisada). Em grade celular, é dada por

$$De = BF^o / CT \quad (1)$$

onde BF^o é o número de células ocupadas por edificação e CT o número total de células.

Permeabilidade: Medi-la é mais complexo. Abordagens correntes medem a permeabilidade focando-se apenas nos blocos (perímetro, área etc.; Pafka & Dovey, 2016) ou nas vias (comprimento, interseções, centralidade; Dai et al., 2023). Propomos um indicador que combina profundidade linear de *isovistas* com a proporção de células livres em um layout 2D. Isovista é o conjunto de todos os pontos dentro do campo de visão a partir de um local específico em um ambiente espacial, capturando tudo o que se pode ver em todas as direções até ser obstruído (Benedikt, 1979). Para cada célula de espaço aberto, o algoritmo lança feixes de visão em todas as direções até encontrar as fachadas dos edifícios vizinhos. O maior desses feixes define a profundidade máxima da isovista dessa célula. Calculamos a média dessas profundidades para todas as células abertas e multiplicamos pelo quociente entre células abertas e o total de células. O resultado captura, num só valor, tanto a permeabilidade local (largura de ruas, vãos entre blocos) quanto a de longo alcance

(extensão e geometria de praças, parques e eixos viários).

$$P = R_{osc} \cdot D_{isov} \quad (2)$$

onde P é o produto de R_{osc} – a razão entre as células vazias e o total de células (vazias + edificadas) – e D_{isov} , a média dos comprimentos máximos das linhas contidas nos isovistas gerados para cada célula de espaço aberto em uma configuração 2D. Quanto maior a permeabilidade, menos os espaços abertos são obstruídos pelas edificações e mais fácil se torna o deslocamento em qualquer direção no assentamento.

Informação: Estimamos a informação espacial calculando a entropia de Shannon em janelas móveis de 16×16 células ($n = 16$) (veja Netto et al., 2023):

$$H = - \sum_x P_x \log_2(P_x) \quad (5)$$

$$nH = H / H_{max} \quad (6)$$

$$I = 1 - nH \quad (7)$$

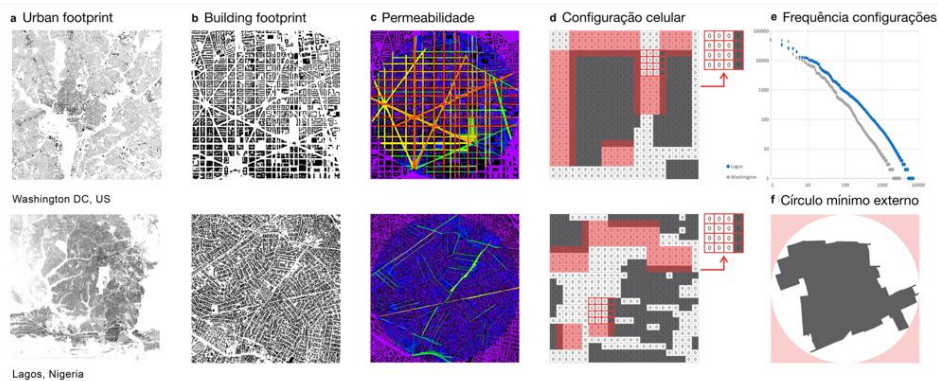
P_x = probabilidade de cada configuração distinta no bloco.

H_{max} = entropia de uma grade totalmente aleatória (50 % células abertas, 50 % edificadas).

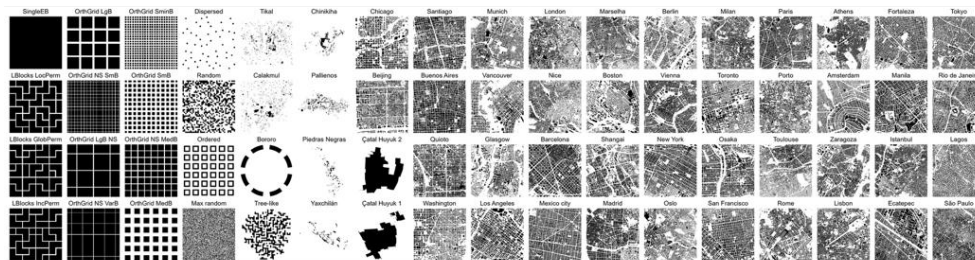
I cresce quando nH diminui, ou seja, quando há mais regularidade (informação estrutural) na distribuição. Para reduzir o efeito de densidades extremas, contamos apenas configurações que ocorrem na interface entre edifício e espaço aberto, ignorando blocos homogêneos.

O procedimento de análise espacial usa *building footprint* (Google Maps) para cidades atuais e dados arqueológicos para proto-cidades. Utilizamos padronização de escala: todas as imagens são redimensionadas para 9 000 000 células (matriz 3000×3000) 0 = espaço aberto; 1 = edificado. Para cidades contemporâneas, recortes de 9 000 000 m² asseguram resolução uniforme. Assentamentos menores (não urbanos/proto-urbanos) usam o perímetro mínimo que engloba todas as construções. O algoritmo varre a grade com janela 16×16 , contando frequências de configurações (Figura 6b). Rotação das formas não altera o resultado. Para assentamentos arqueológicos de pequena área, a densidade foi medida dentro do perímetro mínimo (Figura 6d).

i. Passos metodológicos



ii. Amostra: de configurações teóricas a assentamentos não-urbanos, protourbanos e urbanos



iii. Análise de permeabilidade: linhas isovistas mais longas para cada célula de espaço aberto

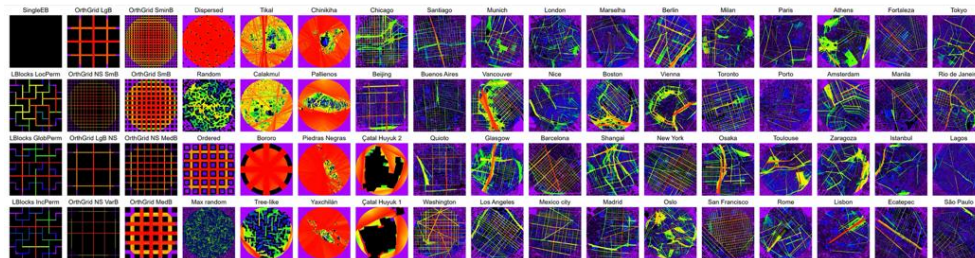


Figura 6. (i) *Etapas metodológicas*: (a) Pegadas urbanas completas. (b) Pegadas de edifícios. (c) Análise de permeabilidade: as cores indicam o comprimento da linha mais longa que atravessa cada célula de espaço aberto, do vermelho (linhas mais longas) ao roxo (mais curtas). A análise é feita em áreas circulares dentro de quadrados de interesse. (d) Informação: o algoritmo percorre o mapa da forma edificada contando frequências de combinações celulares ($n = 16$); o exemplo em rosa mostra onde uma combinação específica ocorre. (e) Número total de combinações $n = 16$: Washington apresenta 2.989 (linha cinza) e Lagos 6.825 (linha azul), de um total de 65.534 combinações possíveis. Washington mostra arranjos regularmente repetitivos, em contraste com a maior variedade observada em Lagos. (f) Nos assentamentos não urbanos e proto-urbanos, densidade e permeabilidade são calculadas a partir do círculo mínimo que engloba todas as edificações. (ii) *Amostra*: 68 casos, abrangendo desde configurações teóricas até cidades contemporâneas. (iii) *Análise*: linhas de isovista mais longas para cada célula de espaço aberto revelam profundidade e forma das áreas livres como características de permeabilidade (fonte: elaborada pelos autores; Google Maps)

Estudo empírico: identificando assentamentos no morfoespaço

Empregamos a abordagem do morfoespaço para investigar variações morfológicas e possíveis transições evolutivas entre assentamentos humanos. O objetivo é compreender como diferentes morfologias se relacionam no “espaço de todas as configurações possíveis”, identificando quais regiões desse espaço são ocupadas por assentamentos reais e quais permanecem

vazias. Cada morfologia é descrita por valores específicos de densidade, permeabilidade e informação, podendo formar agrupamentos que correspondem a tipos distintos de assentamento.

Nossa amostra inclui 42 cidades contemporâneas, 8 assentamentos proto-urbanos — dois setores de Çatal Hüyük (Turquia) e seis sítios maias pré-colombianos (México) — um assentamento de caçadores-coletores (Bororo, Brasil) e cinco

configurações teóricas (Figura 7). Estas últimas — totalmente ordenada, aleatória, em árvore e dispersa — fornecem valores mínimos e máximos de densidade, permeabilidade e informação, servindo de referência para posicionar os assentamentos reais no morfoespaço.

O morfoespaço revela diferenças claras entre tipos de configuração. As cidades contemporâneas não se distribuem uniformemente no cubo: concentram-se numa faixa intermediária de densidade ($\approx 0,35$ – $0,60$), permeabilidade ($\approx 0,25$ – $0,75$) e informação ($\approx 0,20$ – $0,40$).

Algumas destoam:

- Maior informação — Chicago, Pequim, associadas a traçados ordenados;
- Menor densidade — Glasgow, Berlim, Vancouver;
- Baixa permeabilidade — Ecatepec, Manila.

Os assentamentos não urbanos (Bororo e proto-maias) formam outro agrupamento, com densidade muito baixa e permeabilidade alta. Já os dois trechos de Çatal Hüyük exibem níveis bastante distintos entre si. Em geral, grandes porções do cubo permanecem vazias, indicando combinações de propriedades que raramente ou nunca se materializam em assentamentos humanos.

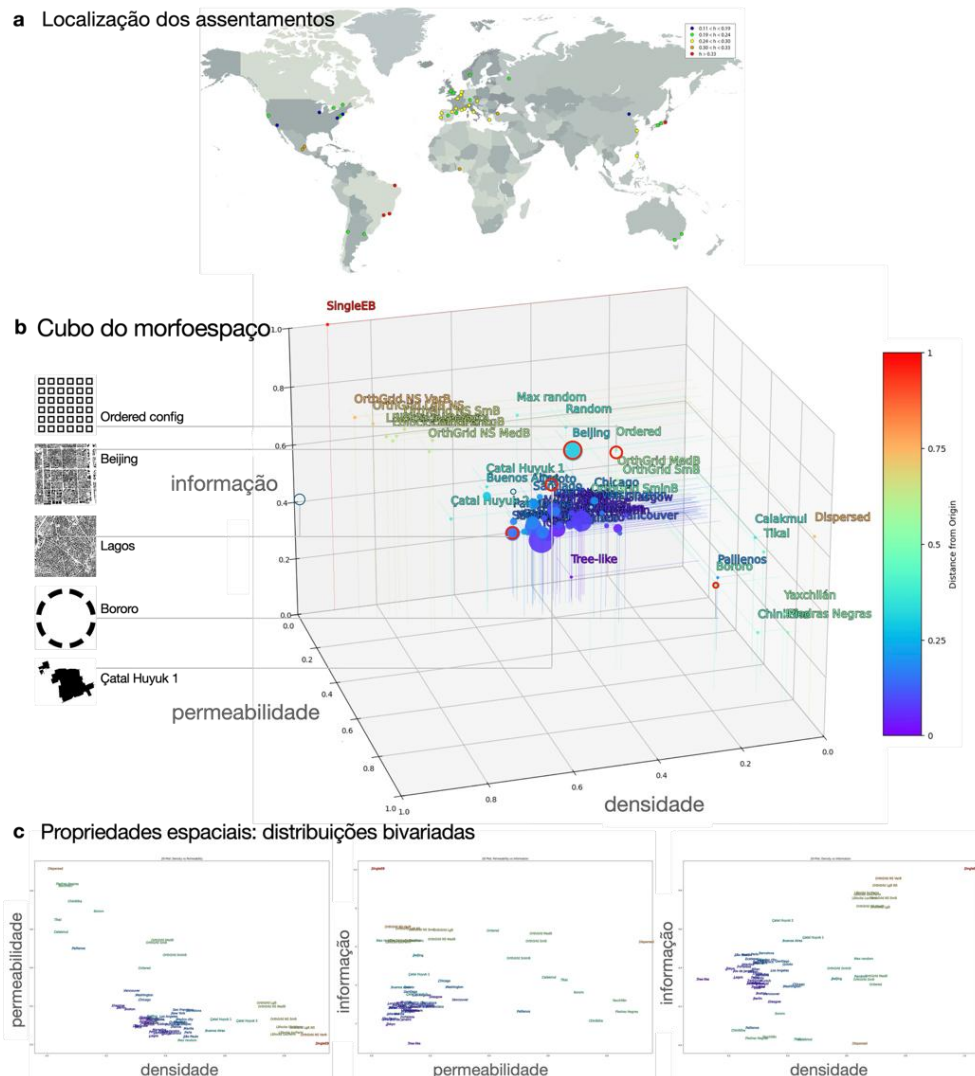


Figura 7. (a) Localização dos assentamentos reais. As cores indicam a quantidade de informação nas distribuições celulares (azul = baixa; vermelho = alta). (b) Pegadas de edifícios em assentamentos urbanos e não urbanos. (c) Morfoespaço tridimensional com densidade, permeabilidade e informação; cores de roxo a vermelho indicam intensidade. O tamanho dos pontos reflete a população (censos, estimativas arqueológicas/antropológicas). (d) Distribuições bivariadas das três propriedades (fonte: elaborada pelos autores)

Conclusões

Este estudo aborda uma questão central dos estudos urbanos: como as cidades surgiram de forma independente em diferentes contextos históricos e regionais e o que distingue suas formas de outros assentamentos. Concebendo a morfogênese urbana como “trajetória através do morfoespaço”, propusemos um arcabouço híbrido — integrando morfologia urbana, biologia e arqueologia — para mapear a evolução dos assentamentos segundo três propriedades estruturais: densidade, permeabilidade e informação. Principais achados:

- Equilíbrio densidade–mobilidade: Hipotetizamos que as cidades emergiram ao resolver exigências conflitantes de densidade e mobilidade; a análise empírica sustenta que os casos reais se concentram justamente onde essas propriedades se equilibram.
- Crescimento que busca estrutura: Os resultados sugerem processos não ergódicos e dependentes do caminho: as cidades percorrem subconjuntos específicos do morfoespaço, moldadas por restrições espaciais, organização social e necessidades funcionais.
- Região urbana do morfoespaço: As cidades ocupam uma faixa surpreendentemente estreita, especialmente em termos de informação e densidade. Assentamentos não urbanos e proto-urbanos aparecem em zonas distintas, mas igualmente limitadas.
- Hipótese do limiar mínimo: Propomos que exista um limiar de densidade, permeabilidade e informação — possivelmente ligado a correlações de longa distância na forma urbana — abaixo do qual um assentamento não consegue sustentar a complexidade funcional típica de cidades.

Implicações:

- A distribuição observada indica que nem todas as configurações possíveis são viáveis; há “zonas proibidas” no morfoespaço urbano.
- Inovações espaciais que equilibram densidade e permeabilidade tendem a ser selecionadas e reproduzidas, criando culturas espaciais específicas e trajetórias *path-dependent*.

Futuras pesquisas podem explorar evidências arqueológicas adicionais e simulações morfogenéticas para compreender como diferentes soluções — do micro (quarteirão) ao macro (rede de quarteirões) — permitem alcançar combinações adequadas de densidade, permeabilidade e informação. O morfoespaço revela-se ferramenta poderosa para entender não apenas onde as cidades estão no “espaço das formas”, mas também quais trajetórias evolutivas lhes são possíveis — e por que certas regiões desse espaço permanecem vazias.

Agradecimentos

Esta apresentação é financiada pela Unidade de Investigação UID/04427 — Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA). Esta investigação é financiada por fundos nacionais através da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do CEEC FCT (projeto 2023.07510.CEECIND) (Portugal). Vinicius M. Netto agradece ainda o suporte do CNPq (projeto 310869/2023-4) e FAPERJ (Brasil) pelo financiamento dos modelos de simulação computacional (projeto E-26/211.381/2021).

Referências

- Alexander, C. (1964) *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Alexander, C. (2002) *The nature of order: an essay on the art of building and the nature of the universe. Vol. 2: The process of creating life*. Center for Environmental Structure, Berkeley, CA.
- Alexander, C. (2003) “New concepts in complexity theory: arising from studies in the field of architecture.” Disponível em <http://www.katarxis3.com> (acesso em 2 mar. 2014).
- Arthur, B. (1994) *Increasing returns and path dependence in the economy*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Bairoch, P. (1991) *Cities and economic development: from the dawn of history to the present*. Trad. C. Braider, University of Chicago Press, Chicago (reimp.).
- Benedikt, M. L. (1979). “To take hold of space: isovists and isovist fields.”

Environment and Planning B: Planning and design, 6(1), 47-65.

Bettencourt, L., Samaniego, H. e Youn, H. (2014) "Professional diversity and the productivity of cities." *Scientific Reports*, vol. 4, 5393, doi: 10.1038/srep05393.

Boyd, R. e Richerson, P. J. (2005) *The origin and evolution of cultures*. Oxford University Press, Nova Iorque.

Brigatti, E., Netto, V. M., de Sousa Filho, F. N. M. e Cacholas, C. (2021) "Entropy and hierarchical clustering: characterising the morphology of the urban fabric in different spatial cultures." *Chaos*, vol. 31, 113138, doi: 10.1063/5.0069258.

Cooper, G. A. e West, S. A. (2018) "Division of labour and the evolution of extreme specialisation." *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, n.º 7, pp. 1161-1167.

Cooper, G. A., Frost, H., Liu, M. e West, S. A. (2021) "The evolution of division of labour in structured and unstructured groups." *eLife*, vol. 10, e71968.

Cowgill, G. (2004) "Origins and development of urbanism: archaeological perspectives." *Annual Review of Anthropology*, vol. 33, pp. 525-549.

Creekmore, A. I. e Fisher, K. D. (eds) (2014) *Making ancient cities: space and place in early urban societies*. Cambridge University Press, Cambridge.

Daems, D. (2021) *Social complexity and complex systems in archaeology*. Routledge, Abingdon.

Dai, X., Dong, Q., Wang, H., Jin, J., e Fang, X. (2023) "Permeability and Its Measurements Tested in Abstract Forms and Four Chinese New Towns." *Buildings*, 13(7), 1779.

Davis, H. (2006) *The culture of building*. Oxford University Press, Oxford.

Davies, P. (2019) *The demon in the machine: how hidden webs of information are solving the mystery of life*. University of Chicago Press, Chicago.

Ekstrom, A. D. e Isham, E. A. (2017) "Human spatial navigation: representations across dimensions and scales." *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 17, pp. 84-89.

Fisher, K. D. e Creekmore, A. (2014) "Making ancient cities: new perspectives on the production of urban spaces." In Creekmore, A. e Fisher, K. D. (eds) *Making ancient cities: space and place in early urban societies*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-31.

Fletcher, R. (2007) *The limits of settlement growth: a theoretical outline*. Cambridge University Press, Cambridge.

Fujita, M., Krugman, P. e Venables, A. J. (1999) *The spatial economy: cities, regions, and international trade*. MIT Press, Cambridge, MA.

Gilmour, D., Rembold, M. e Leptin, M. (2017) "From morphogen to morphogenesis and back." *Nature*, vol. 541, pp. 311-320.

Goulder, J. (2010) "Administrators' bread: an experiment-based reassessment of the functional and cultural role of Uruk bevel-rim bowl." *Antiquity*, vol. 84, pp. 351-362.

Hall, P. (1998) *Cities in Civilization*. Pantheon, Nova Iorque.

Hanson, J. W., Ortman, S. G. e Lobo, J. (2017) "Urbanism and the division of labour in the Roman Empire." *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 14, 20170367.

Hidalgo, C. (2015) *Why information grows: the evolution of order, from atoms to economies*. Basic Books, Nova Iorque.

Hillier, B. e Hanson, J. (1984) *The social logic of space*. Cambridge University Press, Cambridge.

Hoffecker, J. F. e Hoffecker, I. T. (2018) "The structural and functional complexity of hunter-gatherer technology." *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 25, n.º 1, <https://doi.org/10.1007/s10816-017-9332-4>.

Jacobs, J. (1969) *The economy of cities*. Vintage, Nova Iorque.

Kamalipour, H. e Iranmanesh, A. (2021) "Morphogenesis of emerging settlements: mapping incremental urbanism." *Land*, vol. 10, n.º 1, 89.

Kaše, V., Heřmánková, P. e Sobotková, A. (2022) "Division of labor, specialization and diversity in the ancient Roman cities: a quantitative approach to Latin epigraphy."

- PLOS ONE, vol. 17, n.º 6, e0269869, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269869>
- Kauffman, S. A. (2000) *Investigations*. Oxford University Press, Oxford.
- Lambert, P. M. (2002) “The archaeology of war: a North American perspective.” *Journal of Archaeological Research*, vol. 10, n.º 3, pp. 207-241, <https://doi.org/10.1023/A:1016063710831>.
- LeBlanc, S. A. (1999) *Prehistoric warfare in the American Southwest*. University of Utah Press, Salt Lake City.
- McNamara, T. P., Rump, B. e Werner, S. (2003) “Egocentric and geocentric frames of reference in memory of large-scale space.” *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 10, n.º 3, pp. 589-595.
- Mumford, L. (1961) *The city in history: its origins, its transformations, and its prospects*. Harcourt, Brace & Jovanovich, Nova Iorque.
- Netto, V. M., Brigatti, E. e Cacholas, C. (2023) “From urban form to information: cellular configurations in different spatial cultures.” *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 50, n.º 1, pp. 146-161.
- Netto, V.M., Peres, O. and Cacholas, C., (2025). “Entropy and the City: Origins, trajectories and explorations of the concept in urban science.” In Rybski, D. (ed.) *Compendium of Urban Complexity*. Springer Nature, Londres.
- Ortman, S. G., Cabaniss, A. H. F., Sturm, J. O. e Bettencourt, L. M. A. (2014) “The pre-history of urban scaling.” *PLOS ONE*, vol. 9, n.º 2, e87902, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087902>
- Pafka, E. e Dovey, K. (2017) “Permeability and interface catchment: measuring and mapping walkable access.” *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, vol. 10, n.º 2, pp. 150-162.
- Patterson, T. C. (2005) “Craft specialization, the reorganization of production relations and state formation.” *Journal of Social Archaeology*, vol. 5, n.º 3, <https://doi.org/10.1177/1469605305057570>.
- Raup, D. M. (1966) “Geometric analysis of shell coiling: general problems.” *Journal of Paleontology*, vol. 40, pp. 1178-1190.
- Ribeiro, F. L., Zhang, P., Gao, L. e Rybski, D. (2024) “How buildings change the fundamental allometry.” *arXiv preprint*, arXiv:2407.09289.
- Shannon, C. E. (1948) “A mathematical theory of communication.” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423.
- Smith, M. E. (2019) “Energised crowding and the generative role of settlement aggregation and urbanisation.” In Gyucha, A. (ed.) *Coming together: comparative approaches to population aggregation and early urbanisation*. State University of New York Press, Albany, pp. 37-58.
- Smith, M. E. (2023) *Urban life in the distant past: the prehistory of energised crowding*. Cambridge University Press, Cambridge, <https://doi.org/10.1017/9781009249027>.
- Smith, M. E. e Lobo, J. (2019) “Cities through the ages: one thing or many?” *Frontiers in Digital Humanities*, vol. 6, <https://doi.org/10.3389/fdigh.2019.00012>.
- Solich, M. e Bradtmöller, M. (2017) “Socioeconomic complexity and the resilience of hunter-gatherer societies.” *Quaternary International*, vol. 446 (Supl. C), <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.064>.
- Southall, A. W. (1973) *Urban anthropology: cross-cultural studies of urbanisation*. Oxford University Press, Londres.
- Storper, M. e Venables, T. (2004) “Buzz: face-to-face contact and the urban economy.” *Journal of Economic Geography*, vol. 4, n.º 4.
- Trigger, B. G. (1972) “Determinants of urban growth in pre-industrial societies.” In Ucko, P. J., Tringham, R. e Dimbleby, G. W. (eds) *Man, settlement, and urbanism*. Schenkman, Cambridge, pp. 575-599.
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2023) *Total and urban population*. UNCTAD Handbook of Statistics, disponível em <https://hbs.unctad.org/total-and-urban-population/> (acesso em 16 out. 2024).

Ur, J. (2014) “Households and the emergence of cities in ancient Mesopotamia.” *Cambridge Archaeological Journal*, vol. 24, n.º 2, pp. 249-268,

<https://doi.org/10.1017/S095977431400047X>

Wright, H. T. e Johnson, G. A. (1975) “Population, exchange, and early state formation in Southwestern Iran.” *American Anthropologist*, vol. 77, n.º 2.

Tradução do título, resumo e palavras-chave

Trajectories in Morphospace: What distinguishes cities from other configurations?

Abstract. *What distinguishes cities from other human settlements? This article investigates the creation of cities through an approach that integrates urban theory and the biological concept of morphospace — the space of possible configurations. Morphogenesis is conceptualized as trajectories through morphospace, where configurations would be experimented with and progressively selected based on their fitness to support the interactions of agents. The hypothesis is that cities emerged as solutions to potentially conflicting social and material forces: the growing need for density and mobility — mediated by the emergence of properties such as permeability and spatial information. We introduce a new measure of permeability based on the relationship between built and open areas and the depth of isovists — and integrate these properties into the form of a “morphospace cube” as the space of possible configurations. We apply the method to dozens of theoretical two-dimensional configurations, non-urban and proto-urban settlements, and contemporary cities. The proposed morphospace is capable of distinguishing between these configurations and locating a specific region for cities, which display particular signatures of density, permeability, and information. These results support the proposition that cities evolve as solutions that simultaneously intensify and balance fundamental spatial properties, thus enabling them to support complex social functions.*

Keywords. *urban morphogenesis, morphospace, growth in search of structure, division of labor.*

Editor responsável pela submissão: Silvia Spolaor e Ana Mélice Dias.

Licenciado sob uma licença Creative Commons.

