

Según Leach (2009), el desafío central radica en la “planificación del escenario”, un procedimiento esencial para reproducir con precisión los procesos urbanos. Este enfoque opera como un sistema dinámico de prueba y error, generando numerosos resultados potenciales y una variedad infinita de versiones o variantes (Kievid, 2014). En este contexto, la intervención del diseñador adquiere un papel crucial al definir las variables de interacción entre los agentes, ajustar los parámetros y establecer reglas que equilibren la estructura, permitiendo la optimización del modelo sin obstaculizar su evolución. Este método exige un entendimiento profundo de las interacciones y dinámicas entre los agentes individuales para capturar con minuciosidad la complejidad de los procesos urbanos. Una concepción emergente que reemplaza la noción de planes maestros por algoritmos-maestros, un proceso flexible que sincroniza las decisiones micros y macros producidas durante el proceso proyectual. Una articulación de los procesos operativos y niveles abstractos más amplios, sembrando la intencionalidad del diseño en un conjunto de agentes proyectuales autónomos con la capacidad de autoorganizarse en formas urbanas emergentes (Ver Figura 6).



Figura 6. Resultado final de las líneas de metro optimizadas por el algoritmo.

Conclusiones

El *Physarum polycephalum*, una entidad unicelular, ha emergido como un recurso valioso para comprender y ayudar a resolver desafíos en la planificación de redes. Su inherente capacidad de adaptación, influenciada por la interacción con el entorno y las señales ambientales, se traduce en un método de gran flexibilidad para la configuración de sistemas de transporte.

La presente investigación, alineada con los hallazgos expuestos por Kokkugia (2014), ha identificado dos etapas significativas en la dinámica del *Physarum polycephalum*. En primer término, se observa una lógica estigmérgica, análoga a la autoorganización que ocurre en las colonias de termitas, donde los agentes se autoorganizan para producir estructuras. Posteriormente, estos agentes codifican elementos, dando lugar a la formación de sistemas de caminos óptimos. Estas etapas, fundamentales en el estudio y desarrollo de soluciones, permite en una primera fase, generar una red inicial de conexiones entre los agentes, luego, y de acuerdo con las condicionales definidas en el modelo inicial, permiten la reconfiguración del sistema, provocando la creación de corredores eficientes con la mínima distancia entre puntos.

En el contexto específico de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, la implementación del algoritmo inspirado en este organismo unicelular ha demostrado ser una metodología eficaz para el diseño y la optimización de la red de transporte subterráneo. La simulación computacional, respaldada por una detallada información del entorno, ha permitido expandir y mejorar significativamente la red de transporte subterráneo, considerando cuidadosamente la demanda de pasajeros y las distancias entre los diversos barrios. Este avance ha implicado la ampliación de líneas existentes como A, B, C, D, E, H, Premetro, y la creación de nuevas líneas circulares y de conexión como la G, L e I. Estas expansiones han abarcado una diversidad de áreas urbanas, mejorando sustancialmente el acceso al transporte público para los habitantes, mediante conexiones estratégicas.

Este enfoque, basado en la biología y apoyado en algoritmos computacionales, muestra un potencial prometedor en la evaluación y desarrollo de redes e infraestructuras urbanas, presentes y futuras, contribuyendo de manera significativa a la construcción de ciudades más resilientes y eficientes. De igual modo, los principios de crecimiento gradual presentados en este estudio pueden tener aplicaciones en diversas escalas de problemas urbanos, señalando un campo fértil para próximas investigaciones.

Notas

1. La estigmérgia, concebida por Pierre-Paul Grassé para describir la colaboración descentralizada en sistemas como las colonias de hormigas, se basa en la coordinación a través de señales físicas en el entorno. Esta dinámica permite una ejecución eficiente de tareas sin una autoridad central. En entornos biológicos, como las colonias de hormigas, estos indicadores físicos fomentan la coordinación entre individuos para garantizar el funcionamiento colectivo y la supervivencia del grupo. El concepto de estigmérgia ha trascen-

dido su origen biológico para ser aplicado en la inteligencia artificial y la inteligencia de enjambre. Los algoritmos ACO, derivados de estos principios, como la Optimización por Colonia de Hormigas, utilizan la colaboración basada en señales físicas para resolver problemas complejos y optimizar procesos. Este enfoque ha demostrado su eficacia en la creación de sistemas descentralizados adaptativos en distintas áreas científicas y tecnológicas.

2. La evolución del transporte subterráneo en Buenos Aires durante dos décadas refleja un crecimiento general en el número de pasajeros transportados, con fluctuaciones notables. Entre 1993 y 2000, hubo un aumento continuo que alcanzó su punto máximo en 2000, con 256 millones de pasajeros. Sin embargo, entre 2001 y 2002, se experimentó una disminución de casi 37 millones de usuarios. Desde 2003 hasta 2011, se retomó el crecimiento, alcanzando un máximo de 310 millones de pasajeros (PETERS, 2015).

3. El sistema de subterráneos y premetro de la Ciudad de Buenos Aires abarca 59.8 kilómetros, con seis líneas de subterráneo (A, B, C, D, E y H) y una de premetro, conectando 22 de los 48 barrios y cruzando 11 comunas, con un total de 82 estaciones. Las líneas A, B y D se destacaron por transportar la mayoría de los pasajeros en 2013, superando los 36, 77 y 70 millones, respectivamente. El informe de INTRUPUBA del 2007 resalta el perfil demográfico de los usuarios del subte. El grupo de 20 a 29 años representa el 65.0% de los usuarios, mientras que los mayores de 65 años son menos del 2.5%. Predominan las mujeres en el grupo de 15 a 29 años. El 30.0% de los hogares tiene un jefe con título universitario, representando el 58.1% de los encuestados con educación secundaria o superior. La Línea D muestra el mayor porcentaje de jefes de hogar con título universitario (39.2%), mientras que las líneas C y el premetro tienen cifras más bajas (PETERS, 2015).

Referencias bibliográficas

- Adamatzky, A. (Ed.). (2012). *Bioevaluation of World Transport Networks*. University of the West of England. <https://doi.org/10.1142/8482>.
- Dartnell, L. (2012). Matrix: Simulating the world Part II: cellular automata. +*Plus Magazine*. <http://plus.maths.org/content/matrix-simulating-world-part-ii-cellular-automata>.
- Duarte Muñoz, A., Pantrigo Fernández, J. J., & Gallego Carrillo, M. (2007). *Metaheurísticas*. Madrid: Editorial Dykinson.
- Fraile, M. (2012). El nuevo paradigma contemporáneo. Del Diseño Paramétrico a la Morfogénesis Digital. *XXVI Jornadas de Investigación y VIII Encuentro Regional SI + PI*. Buenos Aires: FADU. UBA.
- Fraile, M. (2019). *Arquitectura biodigital: Hacia un nuevo paradigma en la arquitectura contemporánea*. Buenos Aires: Diseño.
- Freiberger, M. (2012). Perfect buildings: the maths of modern architecture. +*Plus Magazine*. Recuperado de <http://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture>.
- García, D., Ramírez, J., Sandoval-Carrillo, S., & Tchernykh, A. (2018). Clasificación de los problemas de optimización de redes de transporte público. *Progmata*, 10, pp. 31-43. Recuperado de <https://doi.org/10.30973/progmata/2018.10.1/5>.

- Gunji, Y.-P., Shirakawa, T., Niizato, T., & Haruna, T. (2008). Minimal model of a cell connecting amoebic motion and adaptive transport networks. *Journal of Theoretical Biology*, 253, pp. 659-667. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.04.017>.
- Irving, T. (2022, Enero 27). *Using a 'virtual slime mold' to design a subway network less prone to disruption*. Universidad de Toronto. Recuperado de <https://phys.org/news/2022-01-virtual-slime-moldsubway-network.html>.
- Jones, J. (2015). Modelling the Biological Behaviour of Physarum. En *From Pattern Formation to Material Computation* (pp. 61-89). Springer International Publishing. Recuperado de http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16823-4_4.
- Kay, R., Mattacchione, A., Katrycz, C., et al. (2022). Stepwise slime mould growth as a template for urban design. *Scientific Reports*, 12, 1322. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05439-w>.
- Kievid, C. (2014). *Swarm Architecture: Space is a Computation* [Tesis de maestría]. Universidad Técnica de Delft, Delft.
- Kokkugia. (2014). *Swarm Urbanism*. Recuperado de <http://www.kokkugia.com/swarm-urbanism>.
- Larrode Pellicer, E., Gallego Navarro, J., & Fraile del Pozo, A. (2015, Abril 21). *Optimización de redes de transporte*. Recuperado de https://www.interempresas.net/Smart_Cities/Articulos/136034-Optimizacion-de-redes-de-transporte.html.
- Leach, N. (2009, Julio/Agosto). Swarm Urbanism. Power to the parametric. *Architectural Design*, 79(4), pp. 56-63.
- Menéndez Ramos, M. (2021). *Análisis del ciclo vital del hongo plasmodial Physarum polycephalum* [Trabajo de fin de grado]. Universidad de La Coruña, La Coruña.
- PETERS (2015). Plan Estratégico y Técnico para la Expansión de la Red de Subtes de Buenos Aires. Banco Interamericano de Desarrollo. Buenos Aires: Subte.
- Rodríguez López, M. (2023). *Procesos de crecimiento eficiente en la naturaleza. El caso de Physarum Polycephalum y las redes de transporte*. [Trabajo de fin de grado]. E.T.S. Arquitectura (UPM), Madrid.
- Tero, A., Kobayashi, R., Nakagaki, T. (2007). A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. *Journal of Theoretical Biology*, 244(4), pp. 553-564. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2006.07.015>.
- United Nations. (2015). THE 17 GOALS - Sustainable Development Goals.

Abstract: In the context of urban planning, biology has emerged as an invaluable source of inspiration and generator of creative solutions to address complex problems. The influence of organisms such as birds, termites, ants and bees has been studied to address challenges inherent to the urban environment. In this line of research, the possibility of using the organic structure of the slime mould, *Physarum polycephalum*, as a model for designing and optimising urban networks and infrastructure has recently been explored. Despite its apparent simplicity as a single-celled organism without a central brain, the slime mould has evolved over millions of years to develop an astonishing dexterity in planning its tubular network, making it a relevant source of inspiration for architecture and ur-

ban planning. The central hypothesis of this research focuses on the idea that the organic structure of slime mould can provide solutions to improve the efficiency and resilience of urban networks. The main objective of this study is to unravel the underlying principles that guide the formation of slime mould tissues and apply them to the optimisation of urban environments. To achieve this, digital technologies and information systems will be used to develop models that emulate their growth. A key component of this research is the incorporation of attractor nodes, which will adjust according to population density and people flows, enabling the creation of smarter and more resilient urban networks. To demonstrate the viability of these concepts in practice, this article develops a specific model based on the Buenos Aires metro system, with the aim of improving its efficiency and sustainability. This innovative approach, which merges biology with architecture, represents a new frontier in the field of urban planning and offers significant applications in diverse urban contexts.

Keywords: Bioinspiration - Slime mould - Urbanism - Urban networks - Optimisation.

Resumo: No contexto do planejamento urbano, a biologia surgiu como uma fonte inestimável de inspiração e geradora de soluções criativas para lidar com problemas complexos. A influência de organismos como pássaros, cupins, formigas e abelhas tem sido estudada para enfrentar os desafios inerentes ao ambiente urbano. Nessa linha de pesquisa, recentemente foi explorada a possibilidade de usar a estrutura orgânica do fungo *Physarum polycephalum* como modelo para projetar e otimizar redes e infraestrutura urbanas. Apesar de sua aparente simplicidade como um organismo unicelular sem um cérebro central, o molde de limo evoluiu ao longo de milhões de anos para desenvolver uma destreza surpreendente no planejamento de sua rede tubular, tornando-o uma fonte relevante de inspiração para a arquitetura e o planejamento urbano. A hipótese central desta pesquisa concentra-se na ideia de que a estrutura orgânica do molde de limo pode fornecer soluções para melhorar a eficiência e a resiliência das redes urbanas. O principal objetivo deste estudo é desvendar os princípios subjacentes que orientam a formação de tecidos de mofo viscoso e aplicá-los à otimização de ambientes urbanos. Para isso, tecnologias digitais e sistemas de informação serão usados para desenvolver modelos que emulem seu crescimento. Um componente fundamental dessa pesquisa é a incorporação de nós atratores, que se ajustarão de acordo com a densidade populacional e os fluxos de pessoas, permitindo a criação de redes urbanas mais inteligentes e resilientes. Para demonstrar a viabilidade desses conceitos na prática, este artigo desenvolve um modelo específico baseado no sistema de metrô de Buenos Aires, com o objetivo de melhorar sua eficiência e sustentabilidade. Essa abordagem inovadora, que funde a biologia com a arquitetura, representa uma nova fronteira no campo do planejamento urbano e oferece aplicações significativas em diversos contextos urbanos.

Palavras-chave: Bioinspiração - Molde de lodo - Urbanismo - Redes urbanas - Otimização
