

PROCESOS DE CRECIMIENTO EFICIENTE EN LA NATURALEZA

El caso de Physarum Polycephalum y las redes de transporte



*A mi padre, a quien le hubiera
encantado leer este trabajo.*

PROCESOS DE CRECIMIENTO EFICIENTE EN LA NATURALEZA
EL CASO DE PHYSARUM POLYCEPHALUM Y LAS REDES DE TRANSPORTE

Estudiante

Maite Rodríguez López

Tutor

Javier Gómez Pioz

Departamento de Ideación Gráfica

Aula TFG 7

Javier Pioz y Pilar Horna, *coordinadores*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Indice

01. Introducción: ¿Planeamiento urbano y biología?	7
02. Resumen y objetivos	8
03. Experimentos de Tokio y últimas investigaciones	11
04. Pero, ¿qué es Physarum?	13
05. Experimentación: Physarum en Madrid	19
06. Conclusiones	69
07. Bibliografía	71
08. Fuentes de las ilustraciones	72

01. Introducción: ¿Planeamiento urbano y biología?

“¿Son las ciudades una extensión de la biología? ¿Es Londres una enorme ballena? ¿Edimburgo un caballo? ¿Es Microsoft un hormiguero gigante?” Estas preguntas se plantea Geoffrey West, uno de los principales científicos que trabajan en un modelo ‘científico’ de ciudad.

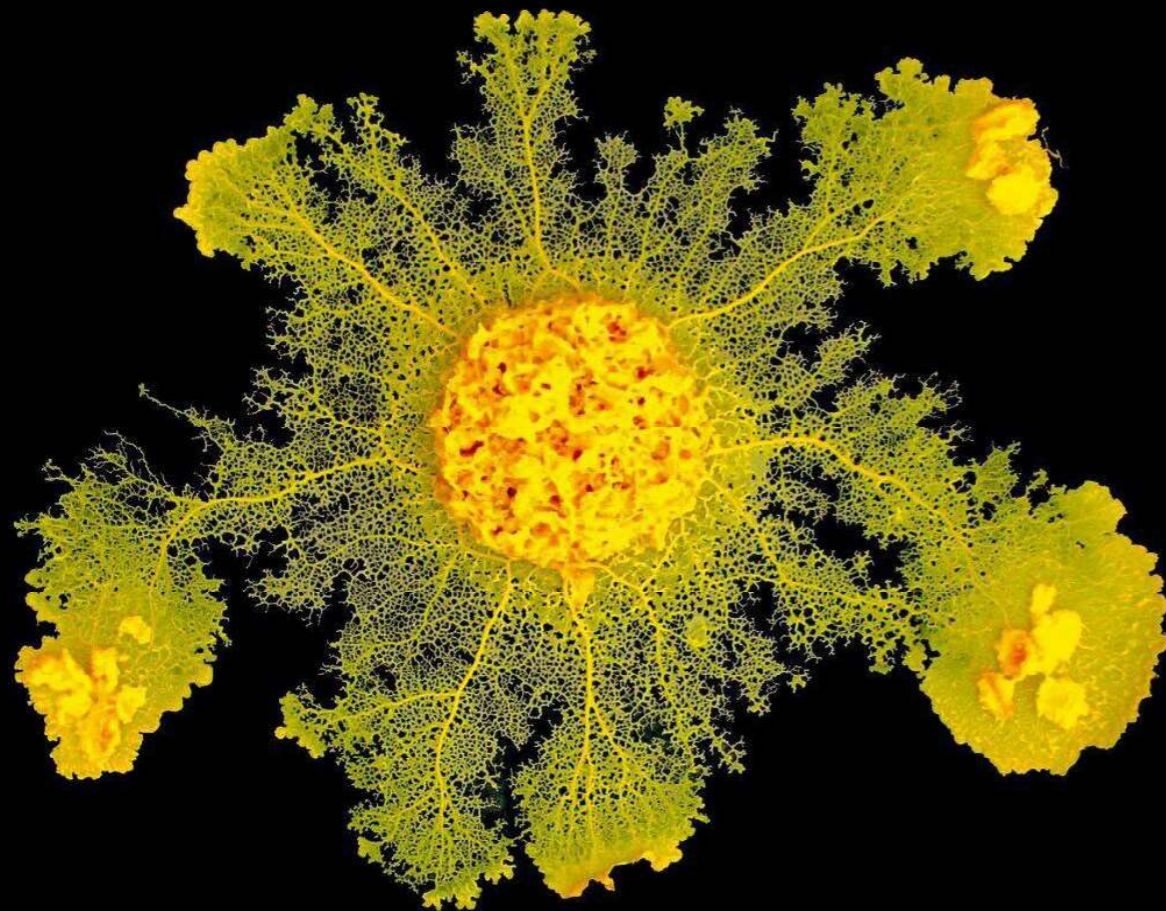


Fig 2. Imagen de Physarum en estado de plasmodio

Si lo pensamos detenidamente, las representaciones del mundo hechas por los seres humanos y asociadas a elementos biológicos, son, en realidad, bastante más comunes y pasan más desapercibidas de lo que creemos. Podemos encontrarlas desde los orígenes del hinduismo, donde se asocian partes del cuerpo de la divinidad Púrusha a partes del universo: el sol creado a partir de su ojo, la luna a partir de su cerebro, hasta nuestros días, en los que a menudo equiparamos las ciudades con órganos biológicos. Algunas de estas equiparaciones han estado más desarrolladas que otras, desde la ciudad como cuerpo humano de Francesco di Giorgio Martini hasta la ciudad como célula de Eliel Sarinene pasando por otras a una escala intermedia de estas dos como la ciudad como tejido de Henry Wright, o sin ir muy lejos, Le Corbusier, quien hacía referencia de nuevo a la ciudad como organismo, refiriéndose a su corazón.

Siempre ha existido esta identificación biomimética del medio donde vivimos y en diversas ocasiones a lo largo de la historia, a medida que el urbanismo y planeamiento se han convertido en una disciplina más relevante a los ojos del mundo, se han podido realizar metáforas y acercamientos más precisos de nuestras ciudades con elementos presentes en la naturaleza.

Existen equiparaciones más modernas que dejan de comparar la ciudad con elementos biológicos de manera explícita e intentan escapar de la analogía y establecen esta comparativa a través de parámetros internos. Un ejemplo interesante es desarrollado en el libro *Scale: The Universal Laws of Life and Death in Organisms, Cities and Companies* de Geoffrey West, donde compara la tasa de crecimiento de las ciudades con las de ciertos animales.

La motivación de este trabajo es, profundizar en este mundo de relaciones

establecidas en la naturaleza y los sistemas humanos, escapando de la biomimesis y la analogía, para acercarnos más a la biónica aplicada al urbanismo.

Hay diversos ejemplos sobre cómo los sistemas naturales han dado lugar a soluciones urbanas a problemas contemporáneos como el sobre uso de la energía en áreas urbanas, la contaminación a través de la captura del carbón o el tratamiento del agua. Estos problemas se han abordado a través de la observación de la naturaleza, bien de una especie o de la interacción entre varias en diferentes ecosistemas. Casos destacables pueden ser el estudio de las hormigas cosechadoras indias aplicado a la ciudad de Lavasa, o el proyecto The Urban Greenprint, que intenta imitar los ciclos naturales de evapotranspiración del agua.

Un ejemplo destacable de este aprendizaje de la naturaleza para la adaptación de soluciones urbanas es el estudio de *Physarum Polycephalum*, popularmente llamado Blob, un protista que se ha utilizado en diversas ocasiones para tratar de optimizar redes de transporte. En este trabajo se pretende, pues, especular sobre un urbanismo que aprende de la naturaleza, a través de propuestas de redes trazadas por Blob y comparaciones con al caso real de Madrid.

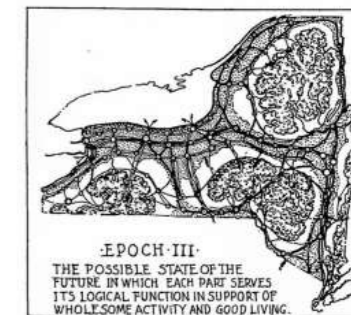


Fig 3. Ciudad construida por células, por Henry Wright

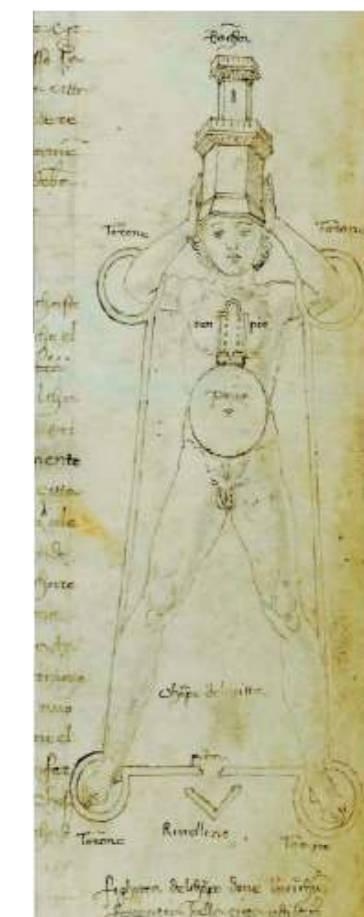


Fig 4. Hombre fortificado, concepto de ciudad en el siglo XV de Francesco Giorgio Martini.

02. Resumen y objetivos

Physarum Polycephalum, en muchas ocasiones llamado *Blob*, es un organismo unicelular plasmoides similar a un moho mucilaginoso de la familia de los Myxomycotas y en su búsqueda de alimento teje redes que pueden alcanzar hasta un metro. En este proceso es capaz de resolver problemas como laberintos de manera eficaz, buscando el camino más corto. Ha sido utilizado en numerosos modelos para estudios de circulación ameboide y movilidad celular y ha tenido aplicaciones como el trazo de redes de transporte o incluso redes cósmicas.

En el siguiente trabajo se investigará sobre el potencial de su sistema de crecimiento. También, partiendo de las conclusiones del experimento de Tokio precedente, se pretende comparar el sistema de crecimiento de *Physarum Polycephalum* con el sistema de redes de transporte de Madrid, de manera gráfica, encontrando un patrón o tejido de *Physarum* en Madrid a partir de la experimentación, por medio de su cultivo, y también de su simulación a través de *Physarealm*.

Palabras clave: arquitectura biónica, *Physarum Polycephalum*, transporte, eficiencia, crecimiento, naturaleza.

02. Abstract

Physarum Polycephalum, often called the *Blob*, is a plasmoid unicellular organism similar to a slime mold of the Myxomycotas family and in its search for food it weaves networks that can reach up to one meter. In this process, he is able to solve problems such as mazes effectively, looking for the shortest path. It has been used in numerous models for studies of amoeboid circulation and cellular mobility and has had applications such as the tracing of transport networks or even cosmic networks.

In the following work, the potential of its growth system will be investigated. Also, based on the conclusions of the previous Tokyo experiment, it is intended to compare the growth system of *Physarum Polycephalum* with the Madrid transport network system, graphically, finding a pattern or tissue of *Physarum* in Madrid from the experimentation, through its cultivation, and also through its simulation through *Physarealm*.

Keywords: bionic architecture, *Physarum Polycephalum*, transport, efficiency, growth, nature.

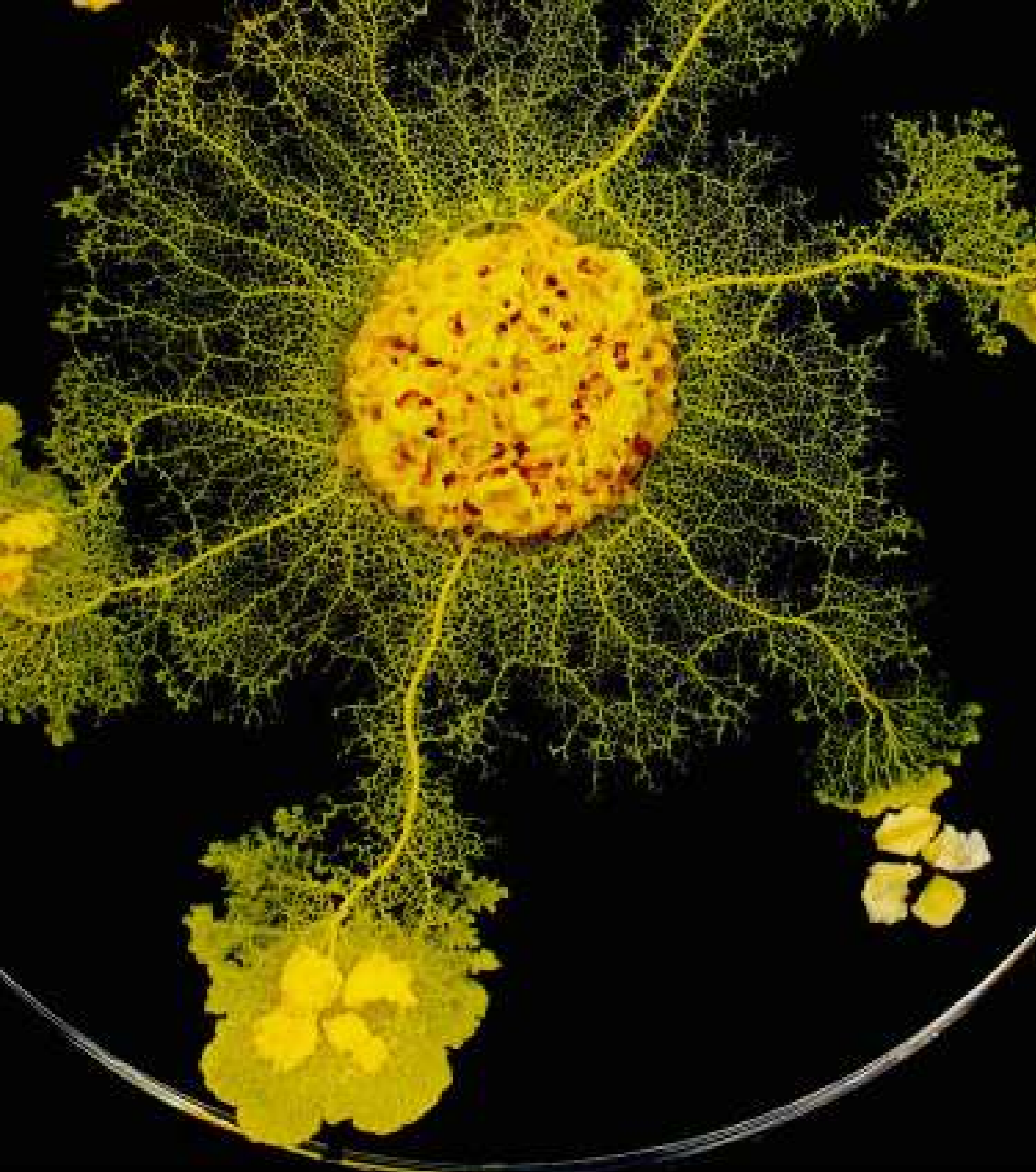


Fig 5. Imagen de Physarum en estado de plasmodio

03. Experimentos de Tokio y últimas investigaciones

Physarum Polycephalum es un organismo unicelular por primera vez descrito a mediados de la década de 1800 y desde el 1960 se han realizado investigaciones sobre cómo vive este organismo. Ha habido incontables estudios sobre el comportamiento de Physarum (por simplicidad, en este estudio nos referiremos al organismo como Physarum) en las últimas décadas, aunque en este apartado sólo se ahondará en los estudios llevados a cabo por Toshiyuki Nakagaki y algunos otros orientados hacia el desarrollo de redes de transporte publicados en los últimos años.

Primeros pasos

Ya en 2001, en *Maze-solving by an amoeboid organism*, se expone cómo Physarum tiene la habilidad de encontrar la ruta más corta entre dos puntos en un laberinto¹ a través de la colocación del organismo sobre un modelo laberíntico y a su vez de sus fuentes de alimento distribuidas en este de manera aleatoria, en este caso copos de avena. Physarum lo resolvería por el camino más eficiente conectando estas fuentes de alimento para servirse de ellas. (Fig. 1)

A partir de este momento, el experimento del laberinto fue repetido y simulado en muchas ocasiones, con la intención de recrear desde carreteras a escala territorial hasta redes de sensores inalámbricas.²

En febrero de 2007 fue publicado un nuevo estudio por la universidad de Hokkaido, dirigido por Nakagaki, *A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold*, en el que se elabora un modelo matemático del crecimiento del organismo. Aquí se demuestra, la dependencia del grosor de los tubos de Blob d con la cantidad de flujo a través de los mismos, observándose la presencia de un tubo principal en su estructura vascular, es decir, una estructura jerárquica.

Más tarde, en agosto de 2007 se publica *Minimum-Risk Path Finding by an Adaptive Amoebal Network*, donde se concluye que Physarum es capaz de lo-

calizar el camino de menor riesgo en un campo homogéneo.³ Entendiendo como riesgo la tasa cuantificada de evitación de la luz que se determina en Physarum a través de la observación de su movimiento sometido a la luz. (Fig.2)

Se comenzó este experimento colocando un cultivo de Physarum que había sido cortado en forma de rectángulo, colocando sus fuentes de alimento en las esquinas (2a). Primero, se iluminó a Physarum parcialmente, con una luz blanca superficial, como se muestra en la misma imagen, quedando el organismo reducido a pocos tubos gruesos que conectan sus fuentes de alimento, como se muestra en las imágenes 2d, 2e y 2f. Se realiza por otro lado este mismo experimento aunque esta vez iluminando superficialmente todo el área donde se encuentra Physarum (2b).

La diversidad de caminos diferentes creadas por Physarum es obvia, sin embargo, se comprueba estadísticamente que el camino realizado por Physarum con iluminación parcial, está compuesto por dos líneas rectas que se intersecan más a la izquierda de la placa cuanto mayor es la intensidad de la luz.

Como resultado, se presenta un modelo adaptativo de una red tubular con estas capacidades inspirado en el movimiento de Physarum, escogiendo el mejor de los resultados obtenido y se concluye que el camino más corto obtenido en un campo homogéneo de riesgo tanto en el modelo presentado como en Physarum, es el resultado de un proceso de optimización en el que el grosor de los tubos de Physarum es determinado por un proceso competitivo que está condicionado por la reacción fotofóbica del organismo.

Experimento de Tokio

Con toda esta información previa que ellos mismos habían hallado, Nakagaki y su equipo realizaron, en enero de 2010, *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*, un estudio aprovechando estas cualidades descubiertas anteriormente en Physarum.

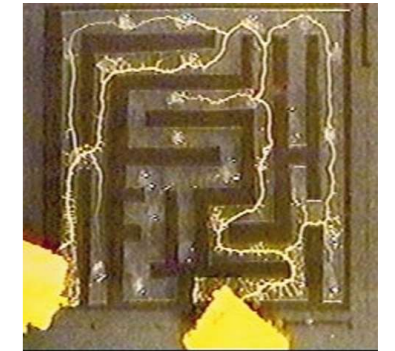


Fig 6. Imagen de Physarum en el experimento Maze-solving by an amoeboid organism

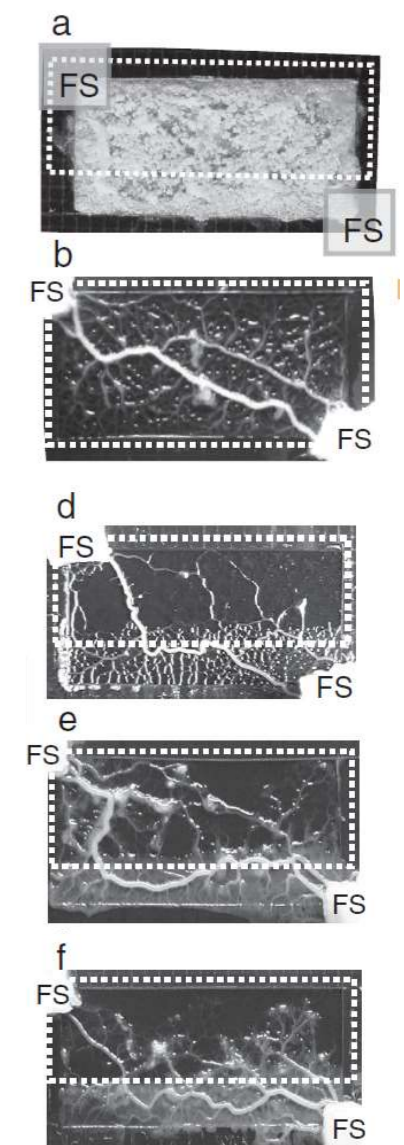


Fig 7. Imágenes de Physarum en el experimento Minimum-Risk Path Finding by an Adaptive Amoebal Network

1 NAKAGAKI, T., YAMADA, H. Y T'OTH, A. (2000) // *Maze-solving by an amoeboid organism*. / En: Nature, [en línea], nº407, p. 470

2 OETTMEIER, C, BRIX, K. Y DÖBEREINER, H. (2017) // *Physarum polycephalum—a new take on a classic model system* / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.50, Nº 41

3 NAKAGAKI, T, IIMA, M., UEDA, T., NISHIURA, Y., SAIGUSA, T., TERO, A., KOBAYASHI, R Y SHOWALTER, K. (2007) // *Minimum-Risk Path Finding by an Adaptive Amoebal Network* / En: Physical Review Letters [en línea], V.99, Nº 6, 068104



Fig 8. Imágenes de Physarum en el experimento Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design

Sobre una placa de Petri con medio de agar se trazó una simulación del mapa de Tokio, donde se colocaron las fuentes de alimento en los lugares de mayor concentración de circulación de la ciudad, necesarios de conectar. Se colocó posteriormente a Physarum en el centro de la ciudad, y se le dejó crecer y abarcar todo el espacio que pudiera durante aproximadamente un día a oscuras, siendo supervisado mediante una cámara de vídeo con una iluminación infrarroja.

Más tarde, a las 26 horas, se iluminó el medio en el que se había expandido, en las zonas donde los accidentes geográficos estaban presentes sabiendo que es fotofóbico, estos representaban obstáculos que debía el organismo debía evitar.

De esta manera, el resultado de la red tubular constituida por Physarum es muy similar a la red ferroviaria ya construida en la ciudad, optimizada a través de un proceso que duró años. No sólo había un gran porcentaje de coincidencia entre estas redes, sino que, en ocasiones, Physarum era capaz de elaborar redes con menos tolerancia al fallo, mayor eficiencia y menor coste en poco más de un día.

Este estudio ganó un premio Ig Nobel y a partir de este momento, se realizaron numerosos ensayos con Physarum en diversos campos del conocimiento.

Physarum en vanguardia

Un ejemplo muy ilustrativo de cómo Physarum resuelve otros sistemas de transporte es el libro *Bioevaluation of world transport networks* de Andrew Adamatzky, donde realiza un experimento parecido evaluando las redes de transporte a escala global.

Adamatzky desarrolla las redes con Physarum con un método algo diferente respecto al experimento de Tokio. En lugar de colocar luz a modo de accidentes geográficos en el cultivo, simplemente se limita el espacio sobre el que puede desplazarse el plasmodio, recortando el papel de filtro en el que se encuentra, en lugar de en medio de agar. Así, realiza numerosos experimentos en los cinco continentes, donde compara de nuevo las redes elaboradas por Physarum con las redes existentes. En este caso no se tiene un control ambiental del proceso y resulta ser bastante más largo que

en el experimento de Tokio, por lo que cada experimento tardaría alrededor de 80 horas en estar finalizado.

Otro experimento más reciente fue llevado a cabo por los investigadores Burchett y Elek de la universidad de California, donde utilizaron un algoritmo de crecimiento del Blob y lo integraron en una simulación digital de los miles de galaxias conocidas en el universo, donde se observó un gran porcentaje de coincidencia del modelo de Blob con lo que consideran una red cósmica de materia oscura que une las galaxias y que ya había sido observada antes por el telescopio Hubble.

Un ejemplo del impacto causado por Blob en la comunidad científica es que, recientemente, en 2021, se llevó a cabo un experimento por la Agencia Espacial Europea en el que se enviaron cuatro placas de Petri conteniendo a Physarum al espacio, con el objetivo de observar su comportamiento en un ambiente con una gravedad diferente.

Recogiendo esta información, no es descabellado pensar que Physarum constituye un objeto biológico muy interesante de estudiar en todos los campos del conocimiento dada su eficiencia.

04. Pero, ¿qué es Physarum?

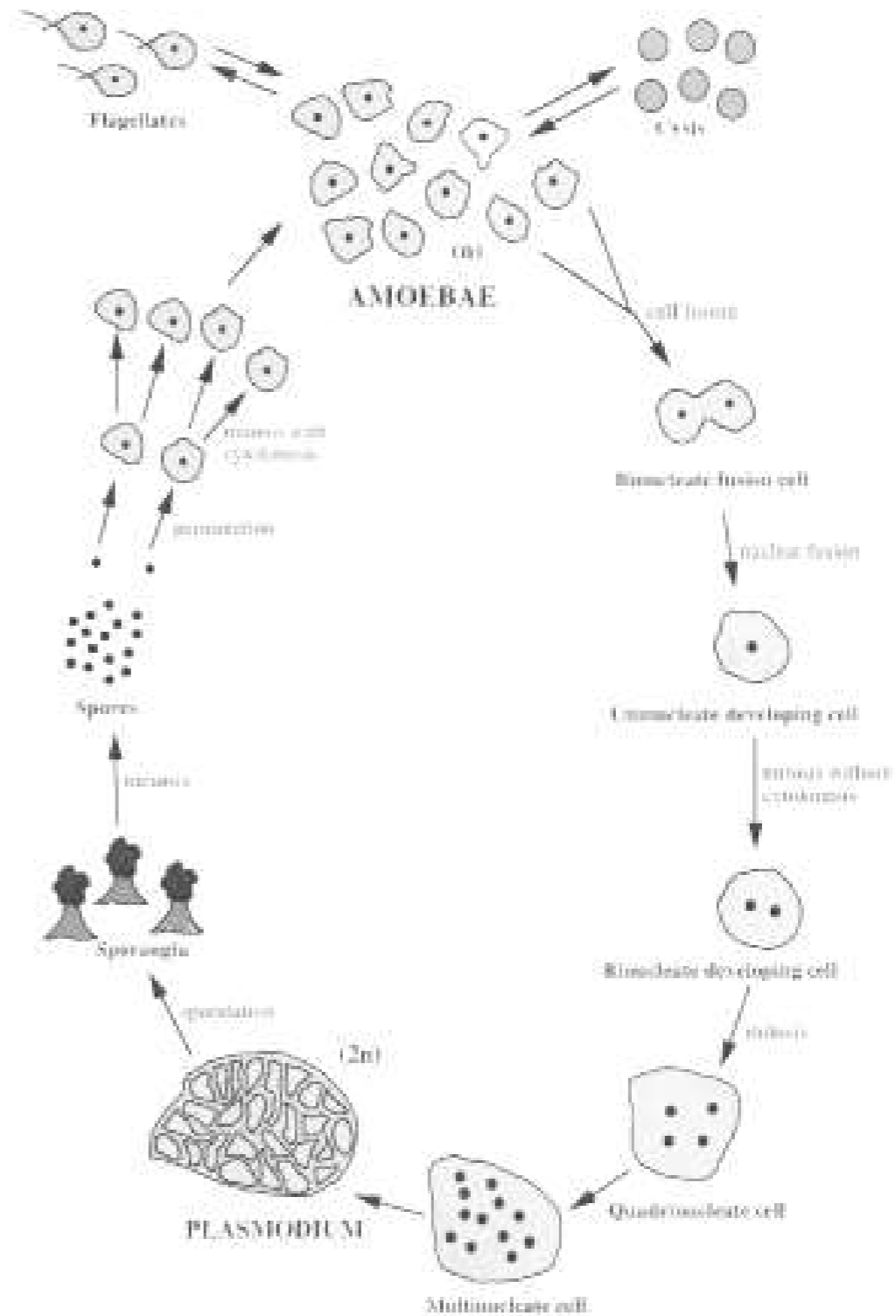


Fig 9. Diagrama del ciclo de vida de Physarum polycephalum

Breve descripción del organismo

Physarum Polycephalum es un organismo unicelular que se aproxima a una ameba, erróneamente clasificado como hongo antes del 1990 debido a su enorme similitud con estos en su apariencia en su fase de esporangio, siendo en realidad un moho de especie Physarales, subclase Myxogastromycetidae, clase Myxomycota, que en ocasiones es llamado moho de limo. El proceso de clasificar a Physarum en una familia de seres vivos ha sido controvertido debido a que es cierto que posee características en común con animales, plantas y hongos.

Physarum es un protista multinuclear, también llamado modo de limo que se puede encontrar en zonas de sombra frescas y húmedas como en troncos en descomposición. Se alimenta por fagocitosis y percibe el alimento a través de receptores presentes en su membrana. Sus desechos son liberados como micro elementos que sirven de alimento a las plantas. Generalmente es de un color amarillo vibrante, aunque hay más de 200 cepas, cuyas principales diferencias son la cantidad de ADN nuclear, el número de cromosomas o la capacidad de fusión con plasmodios de genotipo diferente. Algunos de estos impactan, por lo tanto, en el crecimiento de Physarum¹.

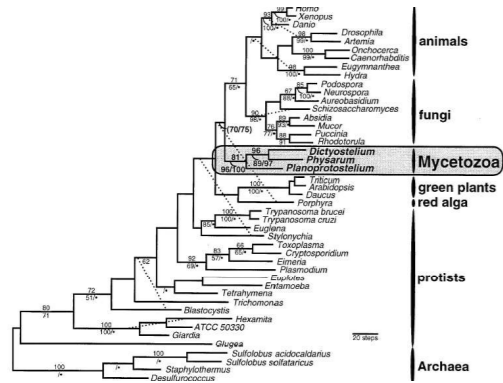


Fig 10. Análisis filogenético de Physarum y su clasificación dentro de las Mycetozoas, 'animales-hongo', pertenecientes al reino Protozoa, que poseen características entre animales, plantas y hongos.

Este organismo ha sido enormemente estudiado, debido principalmente a su carencia de sistema nervioso o de cualquier estructura de procesamiento de datos, a pesar de lo cual es capaz, como hemos visto, de resolver laberintos, pero también puzles, o de poseer memoria.²

Ciclo de vida

El ciclo de vida de Physarum comenzaría por formarse a partir de esporas dispersadas por un Physarum mayor, y a través de la germinación de estas y su posterior mitosis y citocinesis, se forman así nuevas amebas que darán lugar a mixozoosporas, tanto uninucleadas como haploides, es decir, con una cadena de cromosomas. Estas mixozoosporas se dividirán repetidamente para reproducirse originando cigotos ameboides, resultando finalmente un plasmodio con muchos núcleos diploides, es decir, con dos cadenas de cromosomas. Es la fase de plasmodio en la que más tiempo se encuentra en su ciclo de vida y es en esta en la que desarrolla su estructura tubular que se expande en busca de alimento. El plasmodio posee dos partes: por un lado, su parte que en sección se visualiza como una 'esponja', y por otro la que se observa como un 'tubo'.

Cuando este alimento no es encontrado, entonces se forman sobre él los tallos de esporangios, con la intención de reproducirse.



Fig 11. Physarum en estado de esporulación. Esporas negras sobre el cuerpo de Physarum en detrimento, sobre papel de filtro.

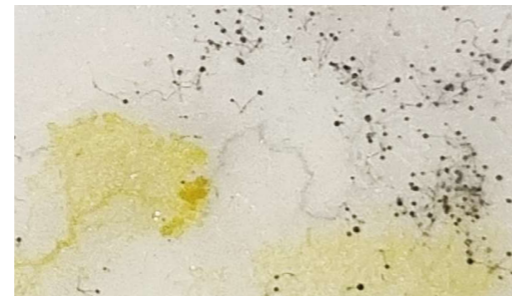


Fig 12. Fotografía de Physarum en estado de esporulación, punto de vista macroscópico.

Existe un estado en el que Physarum se puede encontrar llamado esclerocio, al que fluctúa desde su fase de plasmodio, pero únicamente se colocará en esta fase si sus condiciones de vida son desfavorables, tales como muy bajas temperaturas o falta de humedad o alimento. En esta fase de esclerocio las paredes de Physarum son robustas aumentando su contenido en celulosa.

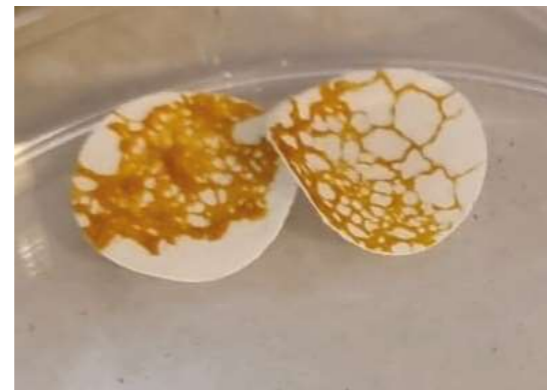


Fig 13. Fotografía de Physarum en estado de esclerocio sobre papel de filtro.

¿Qué necesita Physarum para crecer?

Habitualmente, Physarum crece en lugares húmedos, algo frescos y oscuros, de manera similar a un moho convencional. Para su cultivo, muchos proveedores facilitan una temperatura de 'despertar' (paso de su fase de esclerocio a su fase de plasmodio diploide nuevamente) de Physarum alrededor de los 25°C.

Sin embargo, a partir del estudio de Physarum con diferentes métodos de cultivo, en el trabajo *Análisis del ciclo vital del hongo plasmodial Physarum polycephalum*, se concluye que la temperatura, bien sea de 25°C o 18°C, no influye en el crecimiento del plasmodio.

Al mismo tiempo, esta temperatura no es controlada en los experimentos contenidos en *Bioevaluation of world transport networks*, por lo que no será tenida en cuenta como factor condicionante para el crecimiento del plasmodio en este trabajo.

En *Análisis del ciclo vital del hongo plasmodial Physarum polycephalum*, de los diferentes medios de vida de Blob que se estudian el mejor de ellos es el llamado medio 'MAC': medio basado en avena en copos situados sobre una lámina de agar al 1% en agua destilada, donde los copos se obtuvieron comercialmente y fueron empleados directamente ya que es donde el organismo vive más tiempo y coloniza más la placa de Petri, y siendo también el medio en el que Physarum se expande más rápido. Es por ello, que se utilizará este método en este trabajo.

La luz como obstáculo

Como se ha mencionado antes, Physarum tiene un característico color amarillo, y curiosamente, algunos de estos pigmentos presentes sirven como fotoreceptores, con los que Physarum responde a la luz visible y a la luz ultravioleta ejerciendo fototaxis negativa y se induce la morfogenesis, o dicho de otra manera, se induce el desarrollo de su forma, en caso de falta de alimento, es decir, Physarum entra en fase de esporangio más fácilmente cuando hay incrementos de luz en su medio de vida.

Proceso de crecimiento y optimización

El crecimiento de Physarum se produce en dos fases: una primera fase explorativa en la que el organismo abarca toda la superficie que puede en busca de alimento, en una fase posterior, Blob retrae las ramificaciones que no le llevan a ningún lugar y regruesa su estructura tubular en las conexiones que si le llevan a una fuente de alimento, por lo que genera una jerarquía condicionada por la supervivencia.

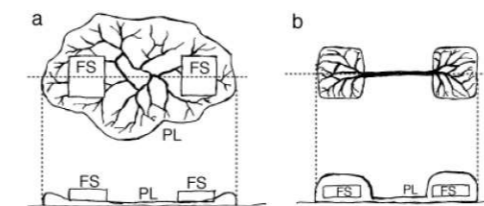


Fig 14. Esquemas ilustrativos en planta y sección de cambio de la estructura de Physarum en respuesta a la presencia de nutrientes. En la situación a), las fuentes de nutrientes son colocadas sobre el organismo, y este las abraza y las conecta entre sí a través de un tubo grueso, resultando una estructura similar al dibujo b).

Según algunas fuentes, es posible que Blob realice esta red de conexiones jerarquizada en una sola fase, sin explorar previamente el terreno, únicamente si un químicoatrayente es colocado en el destino.³

¹ MENÉNDEZ RAMOS, M. (2021) / Análisis del ciclo vital del hongo plasmodial Physarum polycephalum / [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Coruña] / Repositorio Universidad de La Coruña
² OETTMEIER, C, BRIX, K. Y DÖBEREINER, H. (2017) / Physarum polycephalum—a new take on a classic model system / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.50, N° 41
³ OETTMEIER, C, BRIX, K. Y DÖBEREINER, H. (2017) / Physarum polycephalum—a new take on a classic model system / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.50, N° 41
⁴ YAHUI SUN (2017) / Physarum-inspired Network Optimization: A Review
⁵ REID, C.R., LATTY, T., DUSSTOUR, A. Y BEEKMAN, M. (2012) / Slime mold uses an externalized spatial "memory to navigate in complex environments / En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) [en línea] V. 109, n°43

El crecimiento de Blob está íntimamente condicionado a los estímulos del ambiente, incluyendo la presencia de fuentes de alimento, los cambios de temperatura, la exposición a la luz y la posible presencia de depredadores.

A una escala más cercana, la manera en la que Blob se desplaza, es a través de corrientes citoplasmáticas, que producen un ritmo de contracción oscilatorio regular, lo cual altera su forma exterior. Es decir, el flujo de citoplasma en el interior de Physarum está constantemente yendo hacia adelante y hacia atrás, como una marea, con un intervalo de alrededor de 2 minutos. La fuerza necesaria para generar este movimiento es producida por la contracción y relajación de las capas de su membrana exterior que está compuesta por filamentos de actina. Esta capa de filamentos genera un gradiente de presión que produce el movimiento del citoplasma. El protoplasma oscilante le permite absorber nutrientes a través de este flujo, y es esta la razón por la que se regruesan los tubos que se conectan con su fuente de alimento, ya que es capaz de detectar que en estos caminos el flujo de citoplasma contiene mayor cantidad de nutrientes a través de un proceso llamado quimiotaxis, con el cual se detectan nutrientes pero también sustancias potencialmente dañinas. Este engrosamiento, a su vez, estimula un flujo mayor ya que la resistencia del mismo es menor en tanto que los tubos poseen mayor diámetro. Por supuesto, los tubos más cortos necesitan menor cantidad de nutrientes para subsistir, y por ello los tubos más eficientes son los más cortos y gruesos.⁴ Physarum no explora dos veces el mismo lugar en su entorno, ya que, como se ha comprobado, almacena información en una capa externa, a modo de memoria, que le permite recordar la presencia de nutrientes o no, en su entorno.⁵

Es así como se produce la optimización de las redes elaboradas por el plasmodio.

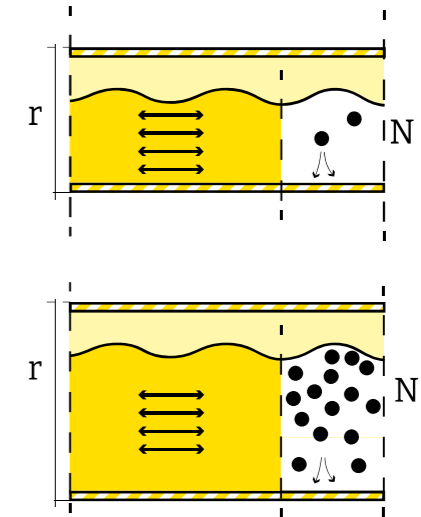


Fig 15. Diagrama sobre método de optimización

Habilidades

Muchas de las habilidades de Physarum han sido ya descritas en este trabajo y respaldadas por determinados experimentos, tales como la capacidad del organismo para encontrar la ruta más corta, asociada a su capacidad para resolver laberintos, y a su capacidad para elaborar redes de conexión optimizadas.

Otras de sus habilidades han sido parcialmente abordadas

como su capacidad de adaptación al medio a través de sus procesos de supervivencia como la quimiotaxis, fototaxis y la termotaxis, propiedades de Physarum que le permiten decidir sus rutas. Un buen ejemplo, es que al aplicar sustancias químicas en cualquier parte del plasmodio, todo el organismo se desplaza hacia o en contra del estímulo⁶. Este fenómeno, como se ha contado anteriormente, también ocurre con la luz, y por si fuera poco, también ha sucedido en una prueba fallida en el experimento presentado en este trabajo (Anexo: prueba y error, 2).

Por otro lado, Physarum también es capaz de memorizar y aprender. Esto fue por primera vez documentado en 2008, en un experimento en el que Physarum fue presentado ante condiciones desfavorables, ante lo cual redujo su velocidad, y cuando estas condiciones desaparecieron, Physarum todavía mantenía una velocidad reducida en su movimiento. Este hecho está íntimamente relacionado con el de tener memoria, lo que se afirma en *Slime mold uses an externalized spatial "memory" to navigate in complex environments*, publicado en 2012.

Blob posee otras habilidades derivadas de todo esto tales como la computación o la inteligencia distribuida. Estas habilidades han sido resumidas a partir de la publicación *Physarum-inspired Network Optimization: A Review*, una de las publicaciones más ilustrativas y organizadas encontradas sobre el tema.

Autoorganización

A pesar de que Physarum es un organismo que posee todas estas habilidades, el comportamiento del organismo estudiado hasta ahora no ha encontrado la existencia de una ley potencial en su movimiento⁷, es decir, una relación matemática entre dos variables que se puedan cuantificar en el movimiento del organismo, tales como una relación entre la toma de decisiones, las variables externas que puedan afectarle y los patrones finalmente creados por el plasmodio. Sin embargo, queda un largo camino por investigar en relación al comportamiento de Physarum, por lo que no podemos asumir que la estructura de sus redes es totalmente casual.

Algoritmos y aplicaciones

Así como existen diferentes maneras de conceptualizar el comportamiento de Physarum, se han propuesto varios algoritmos matemáticos de optimización de redes inspirados en el modelos de crecimiento del organismo. Como en muchos otros casos de aprendizaje de la naturaleza como inspiración para nuevas tecnologías, es posible partir de diferentes comportamientos de Physarum para elaborar algoritmos. Jones divide los acercamientos en 'top-down', en los que se comienza a partir de la observación del comportamiento de Physarum de manera global, y 'bottom-up', en los que se observan comportamientos locales del organismo, como la quimiotaxis.

El primero de ellos fue propuesto por A. Tero en *A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold in 2006*. Este algoritmo fue comprobado de en el estudio *Physarum can compute shortest paths*, concluyendo que puede resolver el camino más corto independientemente de la tipología de la red.⁸

Sin embargo, ha habido numerosas adaptaciones y mejoras de este algoritmo, y la mayoría de los que existen todavía tienen ciertos vacíos en sus bases teóricas. La falta de organización en la producción de este conocimiento son algunas de las causas de que el desarrollo de redes de optimización se encuentre aún en un estado poco evolucionado y lejos de ser reconocido.

Los algoritmos existentes se pue-

den dividir en los siguientes tipos:

- Algoritmos basados en el modelo de conductividad de flujo

Entre ellos se incluye el de A. Tero. Este modelo es uno de los que más se asemeja al comportamiento biológico de la estructura tubular de Physarum y pretenden simular esta condición del flujo cambiante de Physarum en el interior de sus tubos, a modo de venas, y está basado en la ecuación de flujo de Poiseuille.

En este modelo hay nodos que actúan como emisores, las fuentes de alimento, y otros como receptores, la posición original del plasmodio, y existe una presión diferente entre ambos, y la cantidad de flujo en el interior del tubo será proporcional a esta diferencia de presión. La presión vendrá determinada por la cantidad de nutrientes presentes en el flujo de un camino dado.

Cabe destacar que aunque este algoritmo es capaz de resolver el camino más corto, optimizar redes o el problema del viajante entre otros, es cierto que para su utilización se debe presuponer una red ya construida, por lo que esquiva la problemática de la creación de redes y los numerosos factores que pueden afectar en este proceso. Dentro de este modelo existen variantes que multiplican el número de emisores o el de receptores.

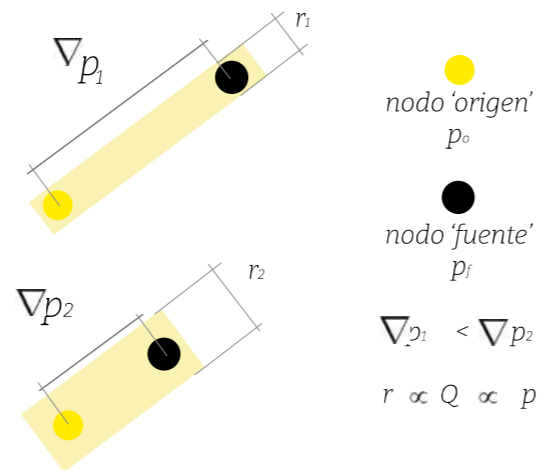


Fig 16. Infografía sobre algoritmo basado en conductividad de flujo

- Algoritmos basados en el modelo celular

Fue propuesto por primera vez en 2008 por Y. P. Gunji en *Minimal model of a cell connecting amoebic motion and adaptive transport networks*. Este modelo sí consideró el crecimiento del plasmodio, al mismo tiempo que su movimiento. Está basado en el comportamiento real de las células de Physarum, consiste en dos fases características del organismo. En primer lugar, el desarrollo y posteriormente la búsqueda de alimento. En la primera fase de desarrollo el crecimiento consiste en una agregación de células desde una célula origen, y en la segunda, la búsqueda. Este modelo tiene en cuenta la transformación de la dureza de la membrana del plasmodio, ya que también está inspirado en la fase de esclerocidio del organismo. En este modelo se consideran diferentes estados en el espacio:

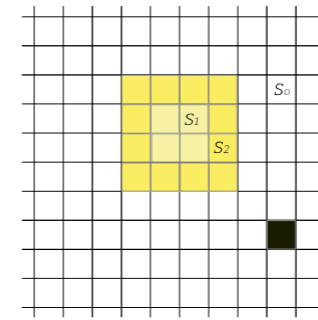


Fig 17. Infografía sobre algoritmos basados en el método celular

Siendo:

- s0: ausencia de Physarum s1: presencia de Physarum en estado inmóvil
- s2: presencia de Physarum en estado 'blando' o móvil
- s3: presencia de fuente de alimento

De esta manera, la tendencia es que s2 colonice s0 en todas las direcciones.

Adamatzky desarrolla también este modelo celular y lo aplica para aproximar algunas carreteras de EEUU y Alemania en *Route 20, autobahn 7, and slime mold: approximating the longest roads in usa and germany with slime mold on 3-d terrains*

- Algoritmos basados en el modelo multi-agente

Es propuesto por primera vez por Jones en 2009 y consiste en el movimiento de numerosos agentes, donde cada uno de ellos percibe estímulos del medio al moverse, y también deposita estímulos en este movimiento. Es decir, los agentes interactúan con el medio y representan el flujo citoplasmático de Physarum. La red generada queda constituida por el patrón del colectivo de agentes y el flujo citoplasmático es representado por los mismos. Este tipo de mecanismo es estigmérgico, es decir, existe una coordinación basada en un rastro dejado en el ambiente por los agentes, y es muy similar al mecanismo de expansión de las hormigas. Matemáticamente, este tipo de algoritmos es de los más sencillos, por lo que se han hecho adaptaciones en softwares de diseño 3D que permiten la generación de gráficos aplicando este algoritmo, como Physarealm.

En este algoritmo, los agentes se distribuyen desde una posición inicial:

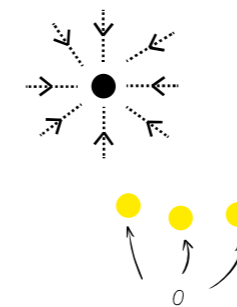


Fig 18. Infografía sobre algoritmos basados en el método multi-agente

⁶ YAHUI SUN (2017) / *Physarum-inspired Network Optimization: A Review*

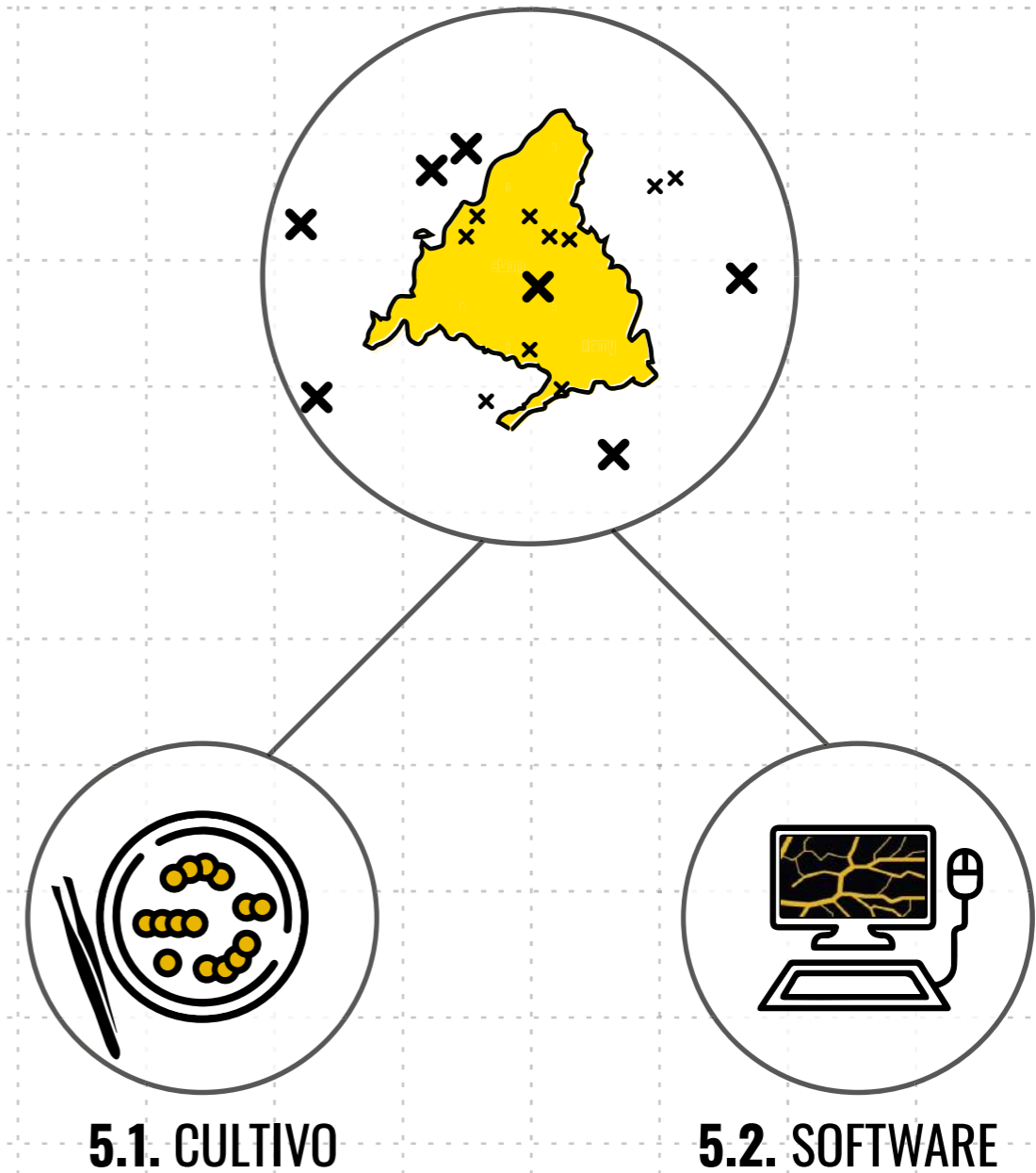
⁷ FLEIG, P., KRAMAR, M., WILCZEK, M. Y ALIMA, K. (2022) / *Emergence of behavior in a self-organized living matter network* / En: eLife [en línea]

⁸ BONIFACI, V, MEHLHORN, K. ; VARMA, G. (2012) / *Physarum can compute shortest paths* / En: *Journal of theoretical biology* [en línea], Elsevier. nº 309 p. 121-133

05. Experimentación: Physarum en Madrid

"In 2006 I got a package from Soichiro Tsuda. He sent me crooked pieces of paper with dark yellowish stuff sticking to them. "Wet the paper. Sprinkle it with oat flakes. And your life will change forever", he wrote. I did as he told. On the next day I saw that the oat flakes were spanned with a network of protoplasmic tubes. The tubes looked like roads."

- Andrew Adamatzky, 2012 -



Se planteare recrearelexperimento de Tokio en la ciudad de Madrid, por un lado se realizará con Physarum de manera física, mediante su cultivo y el dibujo de las redes recreadas, y por otro, esta red se simulará con medios informáticos, mediante el software Physarealm, que aplica el algoritmo de Jeff Jones de 2009.

5.1. CULTIVO DE PHYSARUM

“The slime mould Physarum polycephalum is an ideal biological object for both high-tech laboratories of boffins and kitchen-based citizen scientists. It does not require any specialised microbiological equipment or consumables, or any particular experimental containers or temperature-controlled environment.”

“Physarum polycephalum no requiere ningún equipo microbiológico o consumible, o ningún contenedor experimental particular o un ambiente termocontrolado, por lo que es un objeto ideal de estudio tanto para laboratorios de alta tecnología como para científicos de cocina.”

- Andrew Adamatzky, 2012 -

Objetivo

Elaborar con los cultivos de Physarum un tejido urbano propositivo de la red urbana de transporte de Madrid, que bien podría ser eficiente o no. Analizar este tejido en tanto que sea posible.

Comparar, si es posible, la red urbana de transporte de Madrid y aproximadamente 100 km a la redonda teniendo en cuenta la red principal de carreteras, con las redes elaboradas por Physarum en su cultivo.

Metodología

En el experimento, se utilizará una metodología parecida al experimento de Tokio descrito en apartados anteriores. Las muestras de Blob son obtenidas en las siguientes tiendas online en fase de esclerocio, provenientes de Francia a través de los siguientes proveedores:

1. *Blobshop* (<https://blobshop.fr/es/>), encargado el 5/10/22
2. *Etsy, proveedor particular* (https://www.etsy.com/listing/1264833532/complete-blob-physarum-polycephalum?ref=yr_purchases), encargado el 29/9/22

En general se siguieron las instrucciones de cultivo en el manual de Blobshop (consultado en 15/10), que se resumen a continuación:

- A la llegada de los esclerocios, estos se encuentran colocados en un papel de filtro. Para su despertar, estos se colocarán sobre una placa de Petri con medio de agar preparado 2%, preparado en casa y consecado de 15 minutos posterior a su vertido.

- Se mantendrá 12h en esta placa, hasta que se observen ramificaciones nuevas y un cambio de color un amarillo brillante.

- Después, se trasladará a Blob a una placa de Petri más grande, diferente en cada caso de cultivo, ya que fueron testeándose diferentes placas, como también su cubrición. Para ello se prepara una nueva mezcla de agar 2% y se vierte sobre la misma con un mínimo de 5mm de espesor. Es preciso explicar que para trasladarlo desde la placa de ‘despertar’ se corta el agar en una pequeña porción con él encima, y una vez en la nueva placa se baja de este agar antiguo al nuevo.

- Esta nueva placa tendrá debajo un mapa previamente elaborado de Madrid con sus puntos de concurrencia más importantes señalados (Plano A1), donde se colocará el alimento de Blob, en este caso, copos de avena.

- En ese momento, Blob es colocado en oscuridad, dentro de una caja de cartón y supervisado cada 12h y verificado a través de fotografías.

- Después del proceso explorativo de Physarum, cuando el organismo haya conquistado todas las fuentes de nutriente, se

le coloca encima un filtro impreso en acetato (Plano A2) sobre la tapa de la placa que deja pasar luz en las zonas de mayor altitud, y se mantiene durante aproximadamente 3h. Se decide esta cantidad de tiempo para prevenir la esporulación de Physarum

Al finalizar este proceso, se da por finalizada la creación de la red por Physarum, que en cada ocasión durará un tiempo diferente.

Este proceso se repetirá todas las veces que se pueda y posteriormente se superpondrán los resultados válidos de los experimentos en busca de un patrón gráfico de crecimiento optimizado por Physarum, si se pudiere.

También, después de interpretar los resultados, se medirán las variables descritas en los siguientes apartados, y se compararán si se pudiera, con la red principal de carreteras de Madrid,

Descripción de materiales

Se utilizan los siguientes materiales:



También se utilizan materiales de elaboración propia:

A.1- Plano de poblaciones de Madrid a escala aproximada 1cm/290000m: (Fig 20)

Elaborado a partir del archivo shapefile encontrado en Poblaciones del Centro de Descargas del IGN (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE>, consultado 5/10/2022), seleccionado únicamente núcleos de población de más de 3.5km² del interior de la Comunidad de Madrid, y del exterior, únicamente de las ciudades colindantes, son escogidas con el mismo criterio, además de no encontrarse a más de 4500km.

A.2- Modelo Digital de Elevación de Madrid a escala aproximada 1cm/290000m, impreso en acetato: (Fig 19)

Encontrado en Modelo Digital de Elevaciones, Modelo Digital del Terreno - MDT25 (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE#>, consultado 5/10/2022)

Se consideró la posibilidad de recrear el experimento tanto en Madrid como en Barcelona, pero se descartó por falta de tiempo así como la posibilidad de ampliar el criterio en cuanto a la selección de núcleos de población necesarios a conectar, por ejemplo teniendo en cuenta la cantidad de población de cada núcleo, pero se descartó debido a no encontrarse esta información y a la limitación de tiempo.

Por último, anotar que las escalas y superficies se contemplan de manera aproximada debido a que, en ocasiones, los archivos georreferenciados se encuentran deformados debido al sistema de proyección utilizado.

Disposición de los materiales

El experimento constará de 2 disposiciones de materiales diferentes:

1ª fase: se coloca a Physarum en medio de agar sobre placa Petri de vidrio en una caja de cartón cerrada, protegiéndolo de la luz. En esta fase se alimenta a Physarum cada 12h, observando su progreso, y colocándole fuentes de nutrientes en los puntos definidos en tanto que se vaya acercando a ellos. (Fig. 21)

2ª fase: se traslada a Physarum a una caja de cartón donde se le ilumina con una luz de 1400 lm y 6000K. Entre la luz y Physarum se coloca un vinilo transparente con el plano A3 o B3 impreso sobre el mismo. (Fig. 22)

Interpretación de los resultados

Physarum es un organismo, que como ya hemos visto, es capaz de resolver algunos problemas matemáticos de optimización, sin embargo, es necesario destacar que el organismo no tiene como objetivo resolverlos si se le presentan, por lo que es difícil atribuir una ‘solución’ única a los problemas planteados ya que Physarum está en constante cambio, es decir, en constante búsqueda de alimento y afán de elucidación de riesgos. A pesar de esto, en este trabajo se detectará un único momento a conveniencia en cada experimento, no sin explicar el proceso del mismo y sus peculiaridades.

También será necesario determinar una lectura estándar para todos los cultivos, por lo que se destacaran diferencias entre los tipos de estructura tubular hallado, por lo que se deciden destacar:

- **Grosor mínimo de caminos principales:** Se decide este grosor a través de la observación de las fotografías y de la medición de los tubos de mayor grosor aparente, siendo el mínimo el más pequeño de todos estos. Será diferente en cada experimento.

- **Caminos principales:** los caminos más gruesos marcados por Physarum que conectan nutrientes con el grosor mínimo establecido.

- **Área de presencia completa de la red principal:** existen áreas donde es imposible diferencias una jerarquía tubular

de Physarum a través de las fotografías, y estas se asumen homogéneas y se representan como áreas.

- **Caminos secundarios:** otros caminos que se detectan, que unen los puntos en presencia de alimento, pero que no cumplen con el grosor mínimo establecido para los caminos principales.

- **Caminos de búsqueda inconclusa:** caminos que no conectan fuentes de nutrientes, y que se asumen en proceso de búsqueda.

En cada plano, se señala también:

- **Punto de partida:** donde primero Physarum entra en contacto con el agar de la placa del experimento.

- **Núcleos de población >3.5km² finales:** a pesar de que se establecen núcleos de población definidos en el plano A1, al colocar el alimento de Physarum, estos se desvían ligeramente.

Variables a medir

Se miden las siguientes variables en cada experimento y se comparan entre sí:

- **Longitud de las redes (cm):** de los caminos principales

- **Tiempo hasta “punto estable” (h):** se decide este tiempo cuando Blob haya alcanzado todos los puntos con presencia de alimento, y se le hayan aplicado 3h de luz. En caso de no haber llegado a este estado, se decide el último estado de Blob antes de morir.

- **Número de núcleos conquistados:** el número de puntos de alimento que alcanza Blob, en caso de no alcanzarlos todos.

- **Área de presencia completa de la red principal:** (cm²)

Número de cultivos

Se realiza un total de 12 cultivos, aunque los primeros 7 cultivos, no consiguen elaborar una red con todos los núcleos de nutrientes conquistados. Estas redes también son objeto de medida, aunque se descartan en la búsqueda de un patrón y su comparación final



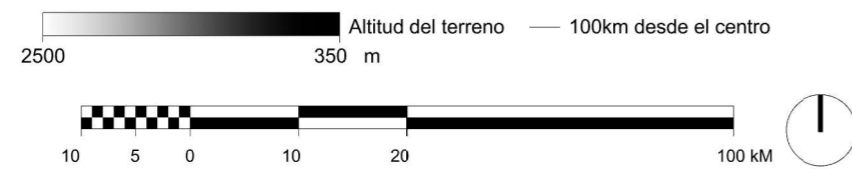


Fig 19.A.2- Modelo Digital de Elevación de Madrid, impreso en acetato:

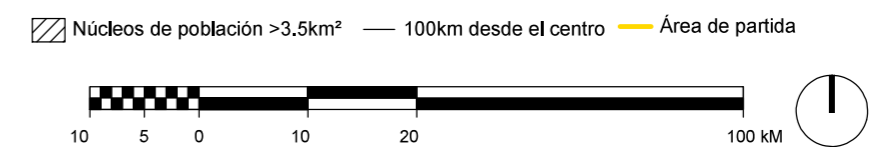
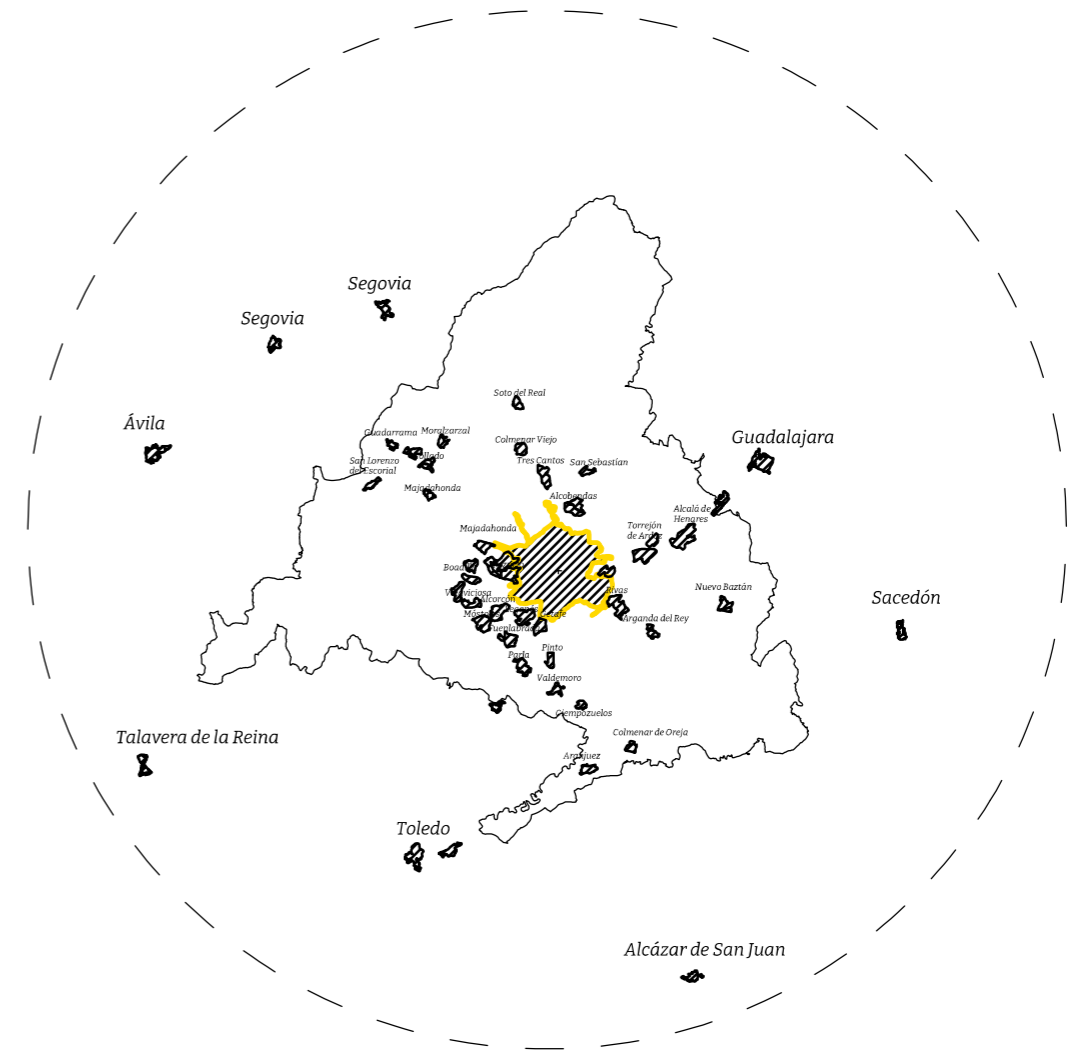


Fig 20. A.1-Plano de poblaciones de Madrid

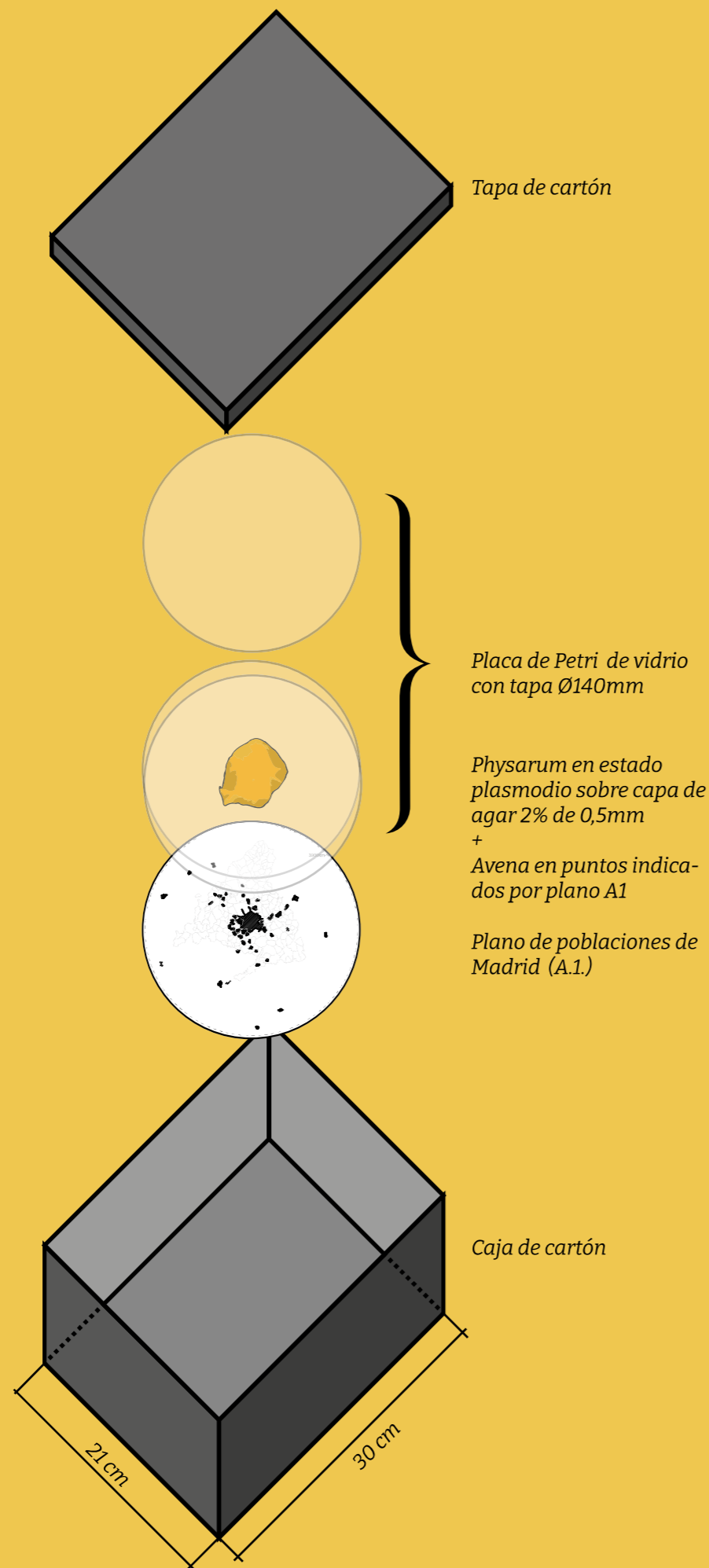


Fig 21. Fase primera de la colocación del cultivo de Physarum

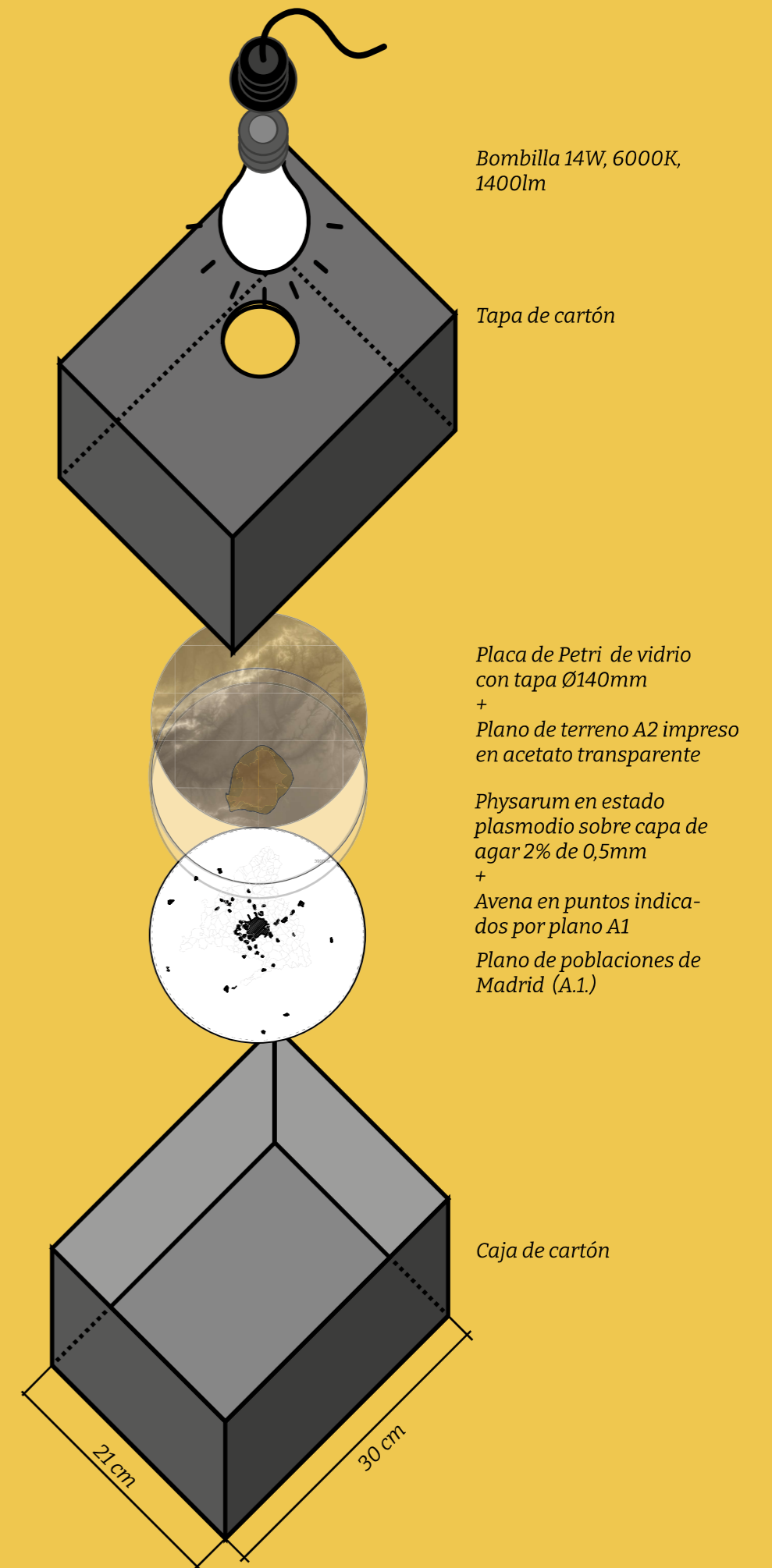


Fig 22. Fase segunda de la colocación del cultivo de Physarum

Resultados

En los siguientes experimentos se siguieron las instrucciones de cultivo en el manual de Blobshop (consultado en 15/10).

- Experimento P1 (16/10 - 18/10)

La placa en la que se realiza este experimento es de polipropileno, de 14 cm de diámetro. No se generó una red con los puntos propuestos, dado que se interrumpió debido a un error metodológico descrito a continuación:

Se preparó el medio de vida de Physarum con una capa de agar de un grosor insuficiente, de menos de 5mm, y se aplicó calor dado que, según algunas fuentes, favorece el crecimiento del organismo. Sin embargo, la mezcla de agar se secó debido a este exceso de calor. Como resultado, ocurrió que al secarse la lámina de agar, esta perdió su textura gelatinosa y adquirió una textura plástica, y Physarum se desplazó únicamente en las zonas en las que esto no había ocurrido. A las 48h, gran parte del agar se había secado, y como resultado Physarum se desplazó y quedó en un pequeño área, retirando sus ramificaciones o haciéndolas tan delgadas que eran imperceptibles. Después de este proceso, Physarum entró en fase de esclerocio. Se dio por finalizado el experimento y no hubo, por tanto, la elaboración de una red de conexiones.

- Experimento P2 (2/11 - 6/11)

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico, de 13 x 18cm. No se generó una red con los puntos propuestos, dado que se interrumpió debido a un error metodológico descrito a continuación:

Se preparó el medio de vida de Physarum con una capa de agar de un grosor suficiente, y no se aplicó exceso de calor al

cultivo. Sin embargo, si se colocó un envase con una fina capa de agua, cerca del cultivo, con la intención de aumentar la humedad en el medio. En el traslado de Physarum, este agua fue vertida por error en la superficie de la caja de cartón, debajo de la placa donde se encontraba el plasmodio, y debido al exceso de humedad, este se desplazó en sentido contrario de la corriente de agua, recogiendo de nuevo sus ramificaciones. Después de unas horas, Physarum se encontraba en fase de esclerocio. Ambos errores, A y B fueron desarrollados con el mismo cultivo, es decir, A en esclerocio fue utilizado para B, a través del mismo proceso de transición esclerocio-plasmodio utilizado anteriormente en el esclerocio recién llegado. En este punto, fue necesario colocar un cultivo nuevo a partir de un nuevo esclerocio para cultivos posteriores

- Experimento P3 (9/11 - 14/11)

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico, de 13 x 18cm, sin tapa. No se generó una red con los puntos propuestos, dado que se interrumpió debido a un error metodológico descrito a continuación: A diferencia de las pruebas anteriores, la duración de este experimento fue de 5 días. En esta ocasión, para evitar cualquier tipo de incidente, no se favoreció la humedad el medio a través de la colocación de una lámina de agua cerca de la placa. Se intuye que fue este motivo el que redujo notablemente la velocidad del plasmodio, y por consiguiente, se dilató el tiempo del experimento. En este caso, Physarum exploró gran parte de la zona, pero antes de haber conquistado todos los puntos previstos para la creación de la red. Sin embargo, se asume que la gran duración del proceso ocasionó la esporulación.

- Experimento P4 (13/11 - 17/11):

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico,

de 13 x 18cm, con tapa. El experimento P5 avanzó muy lento, es el que menos abarcó la superficie de la placa. Se decidió tapar con otra placa de acrílico, ya que se llegó a pensar que la humedad era insuficiente y por eso se producía la esporulación. Pero acabó esporulando en menor tiempo, también en el centro de la placa

Ocurrió algo parecido en los siguientes experimentos, que siempre acabaron en esporulación:

- Experimento P5 (13/11 - 17/11)

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico, de 13 x 18cm, sin tapa. No se generó una red con los puntos propuestos, dado que se interrumpió debido a un error metodológico descrito a continuación: El esclerocio final de P2 se volvió a utilizar en este cultivo. En la fase transitoria a plasmodio, este quedó parcialmente inutilizable debido a su esporulación temprana, pero fue posible realizar el experimento a partir del plasmodio desarrollado. Este se colocó nuevamente en una placa de Petri, donde al desarrollarse, Physarum pasó a esporular en el centro de la placa.

- Experimento P6 (15/11 - 18/11):

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico, de 13 x 18cm, con tapa. Se decidió tapar con otra placa de acrílico, ya que se llegó a pensar que la humedad era insuficiente y por eso se producía la esporulación, pero esporuló, después de 3 días, en el centro de la placa.

- Experimento P7 (17/11 - 22/11):

La placa en la que se realiza este experimento es de acrílico, de 13 x 18cm, con tapa. Se decidió tapar con otra placa de acrílico, ya que se llegó a pensar que la humedad era insufi-

ciente y por eso se producía la esporulación. Por esto mismo, se envolvió la caja de cartón con film plástico en el interior, con la intención de mantener la humedad. Finalmente esporuló después de 5 días, en el centro de la placa. Este experimento fue importante en tanto que, al mantenerlo tanto tiempo, se observó la aparición de manchas verdes distribuidas en la placa Petri, tanto en el agar como en la avena.

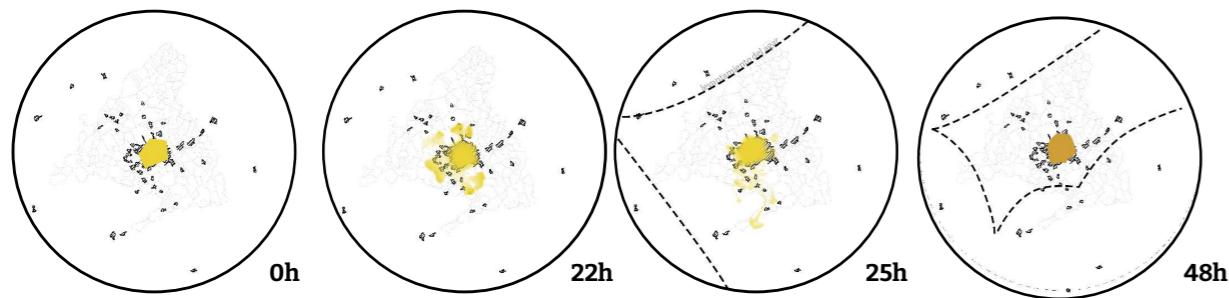


Fig 23. Dibujos del proceso 1, donde se observa la expansión de Physarum a las 22h, el levantamiento del agar a modo de plástico a las 25h, y el encogimiento de Physarum a las 48h

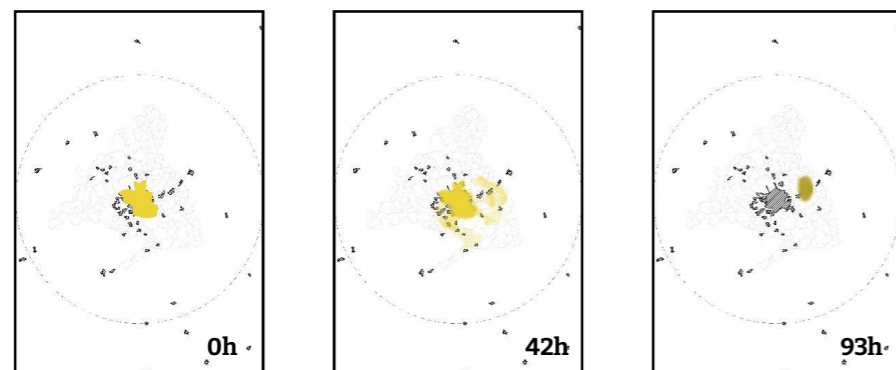


Fig 24. Dibujos del proceso 2, donde se observa la expansión de Physarum a las 42h y su desplazamiento y encogimiento a las 93h

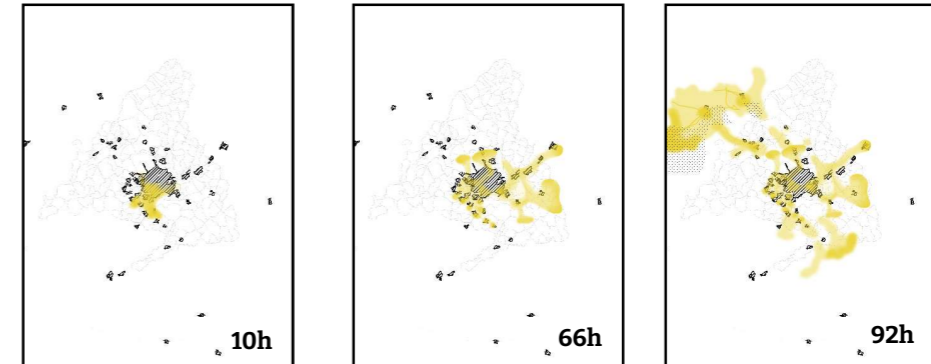


Fig 25. Dibujos del proceso 3, donde se observa la expansión de Physarum a las 66h, y la esporulación a las 92h al noroeste de la zona, grafada a modo de puntos negros.

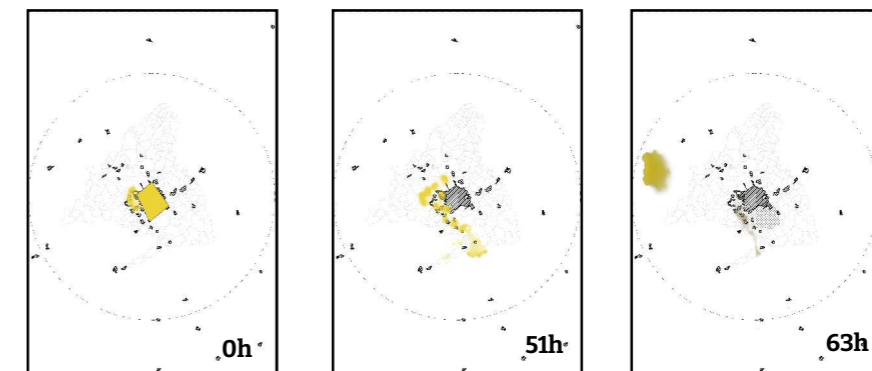
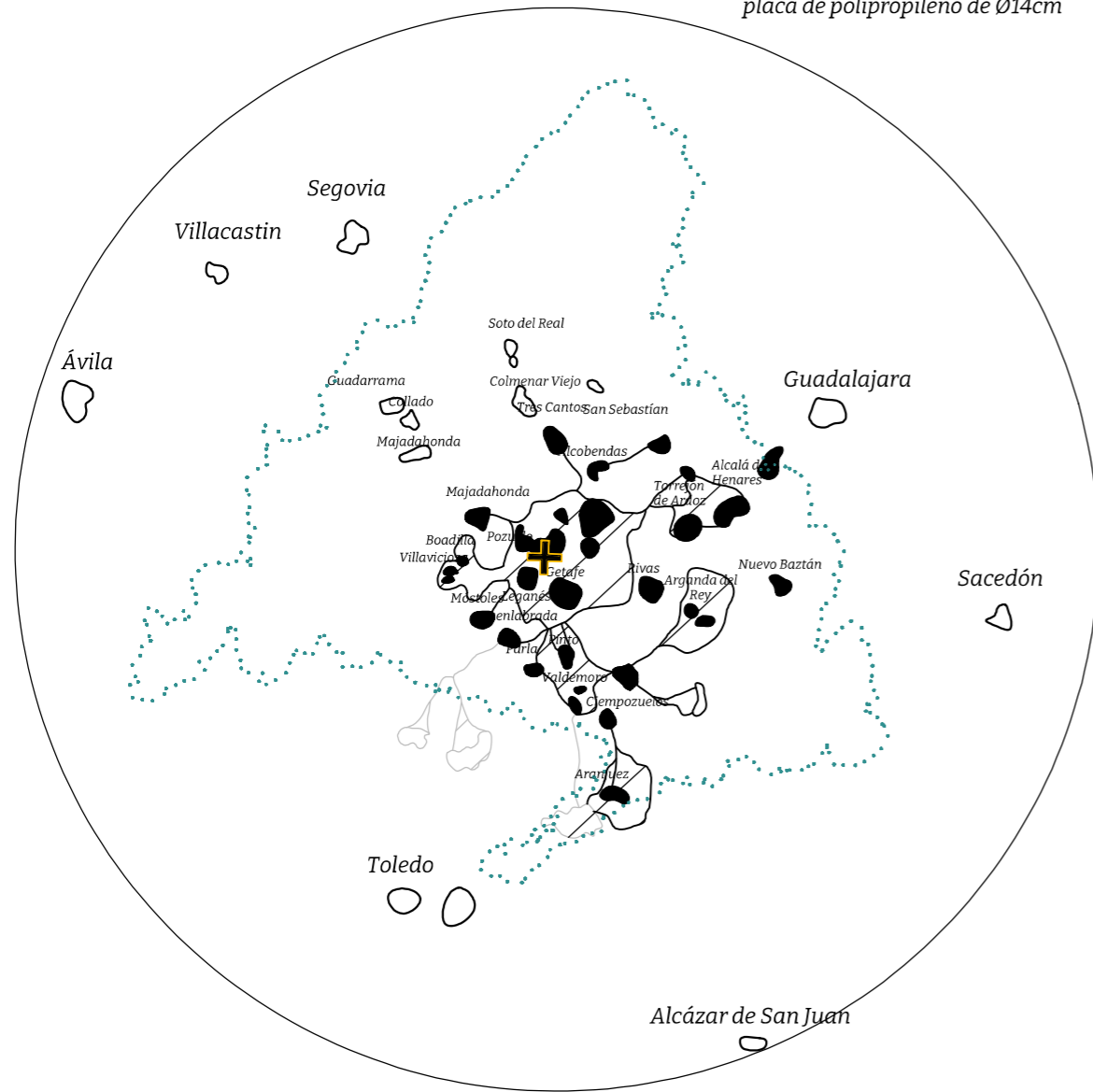


Fig 26. Dibujos del proceso 4.

placa de polipropileno de Ø14cm



- Núcleos de población >3.5km² finales
- Núcleos de población >3.5km² no alcanzados
- ▨ Presencia en toda la superficie
- ▧ Presencia en toda la superficie en caminos de búsqueda inconclusa
- Rutas principales
- - - Rutas secundarias
- · · Rutas de búsqueda inconclusa
- ⊕ Punto de partida
- · · Delimitación CAM

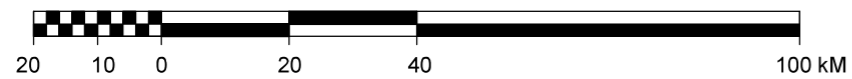
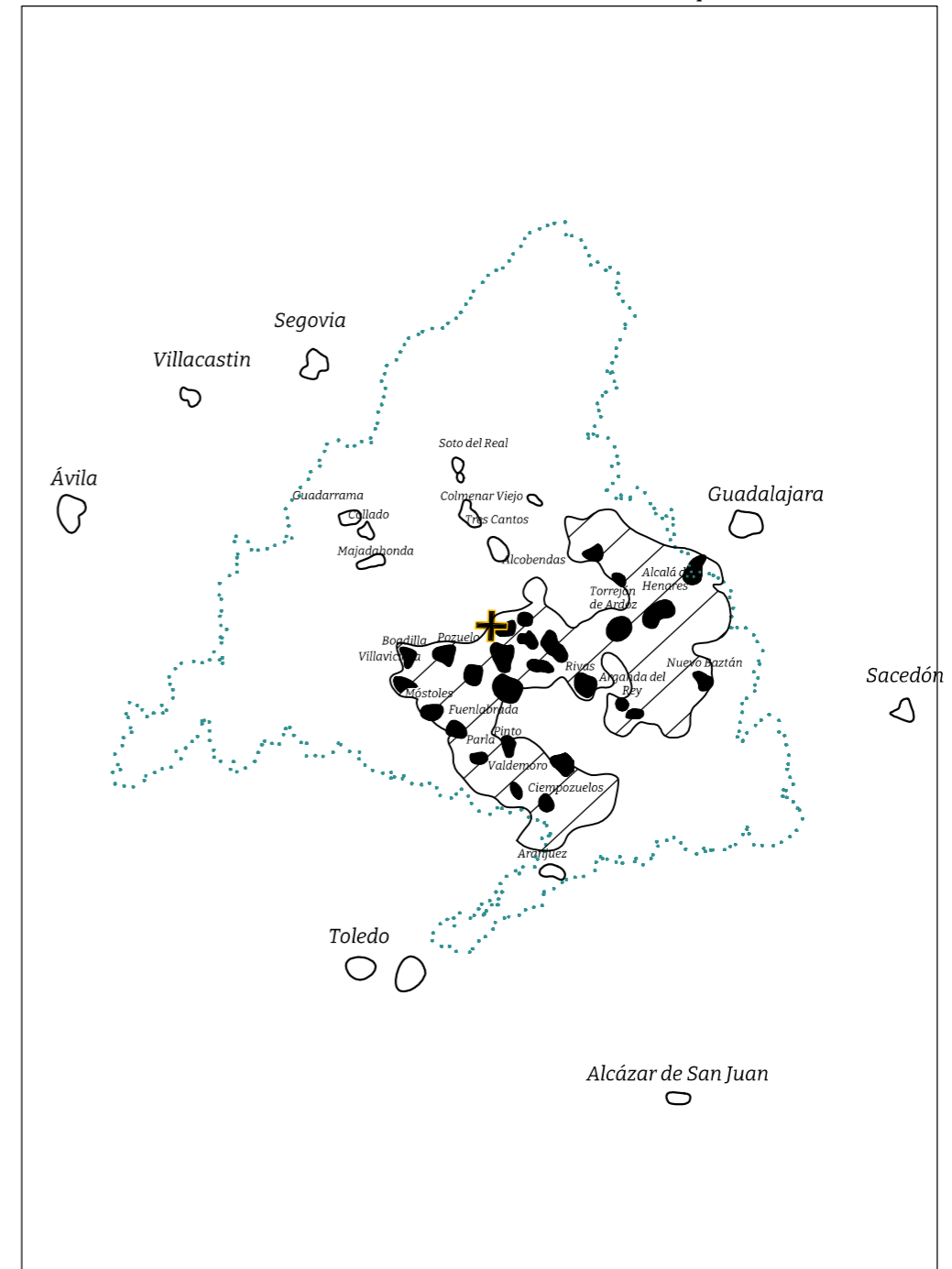


Fig 27. Clasificación de red en cultivo 1

placa de acetato 13 x 18cm



- Núcleos de población >3.5km² finales
- Núcleos de población >3.5km² no alcanzados
- ▨ Presencia en toda la superficie
- ▧ Presencia en toda la superficie en caminos de búsqueda inconclusa
- Rutas principales
- - - Rutas secundarias
- · · Rutas de búsqueda inconclusa
- ⊕ Punto de partida
- · · Delimitación CAM

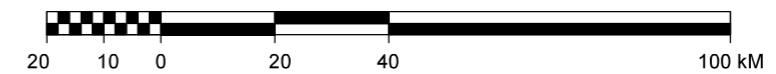
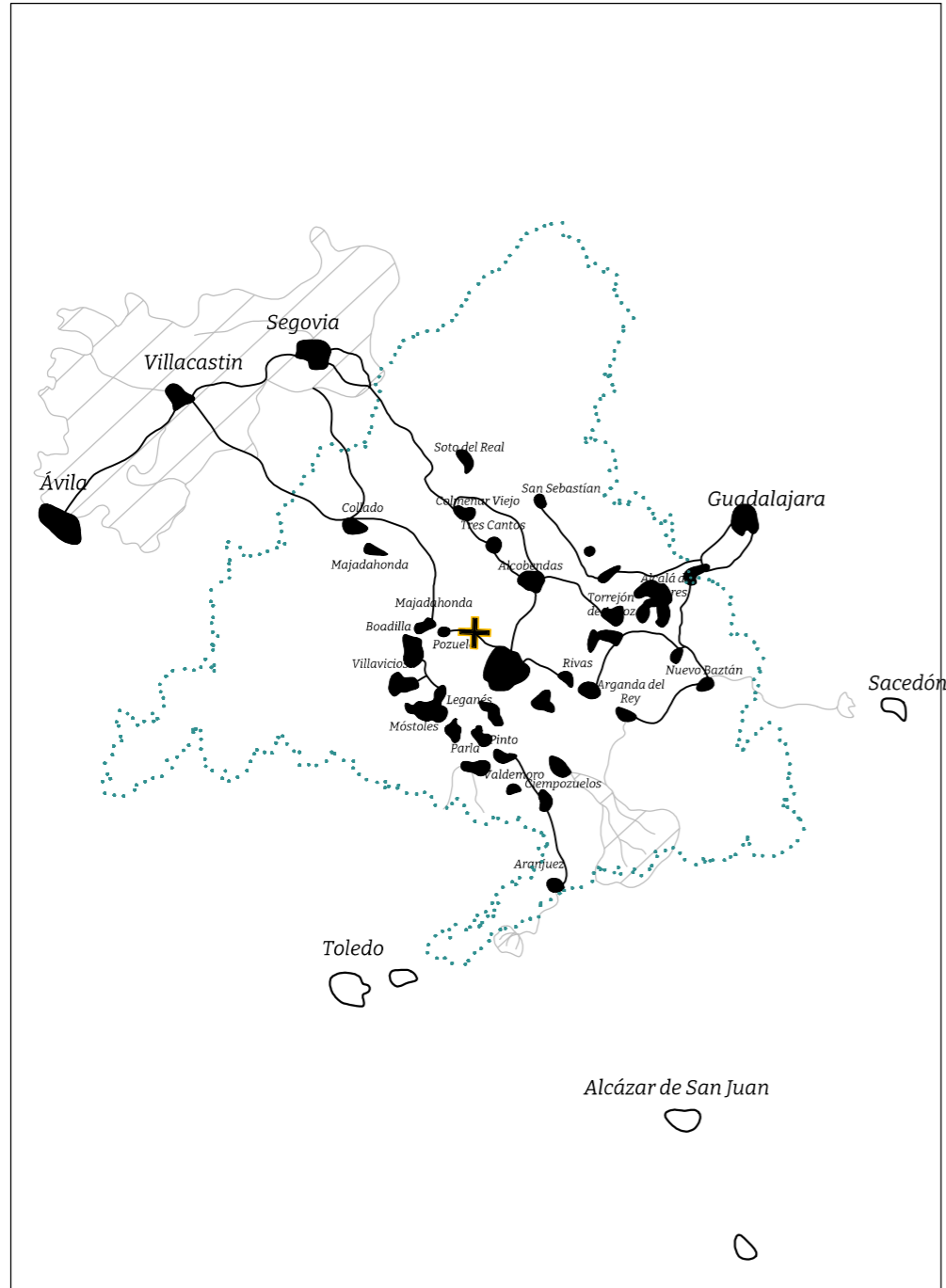


Fig 28. Clasificación de red en cultivo 2



- Núcleos de población >3.5km² finales
- Núcleos de población >3.5km² no alcanzados
- ▨ Presencia en toda la superficie
- ▩ Presencia en toda la superficie en caminos de búsqueda inconclusa
- Rutas principales
- - - Rutas secundarias
- Rutas de búsqueda inconclusa
- ✚ Punto de partida
- Delimitación CAM

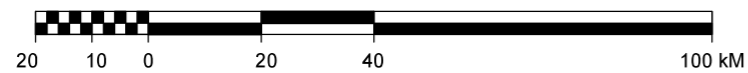
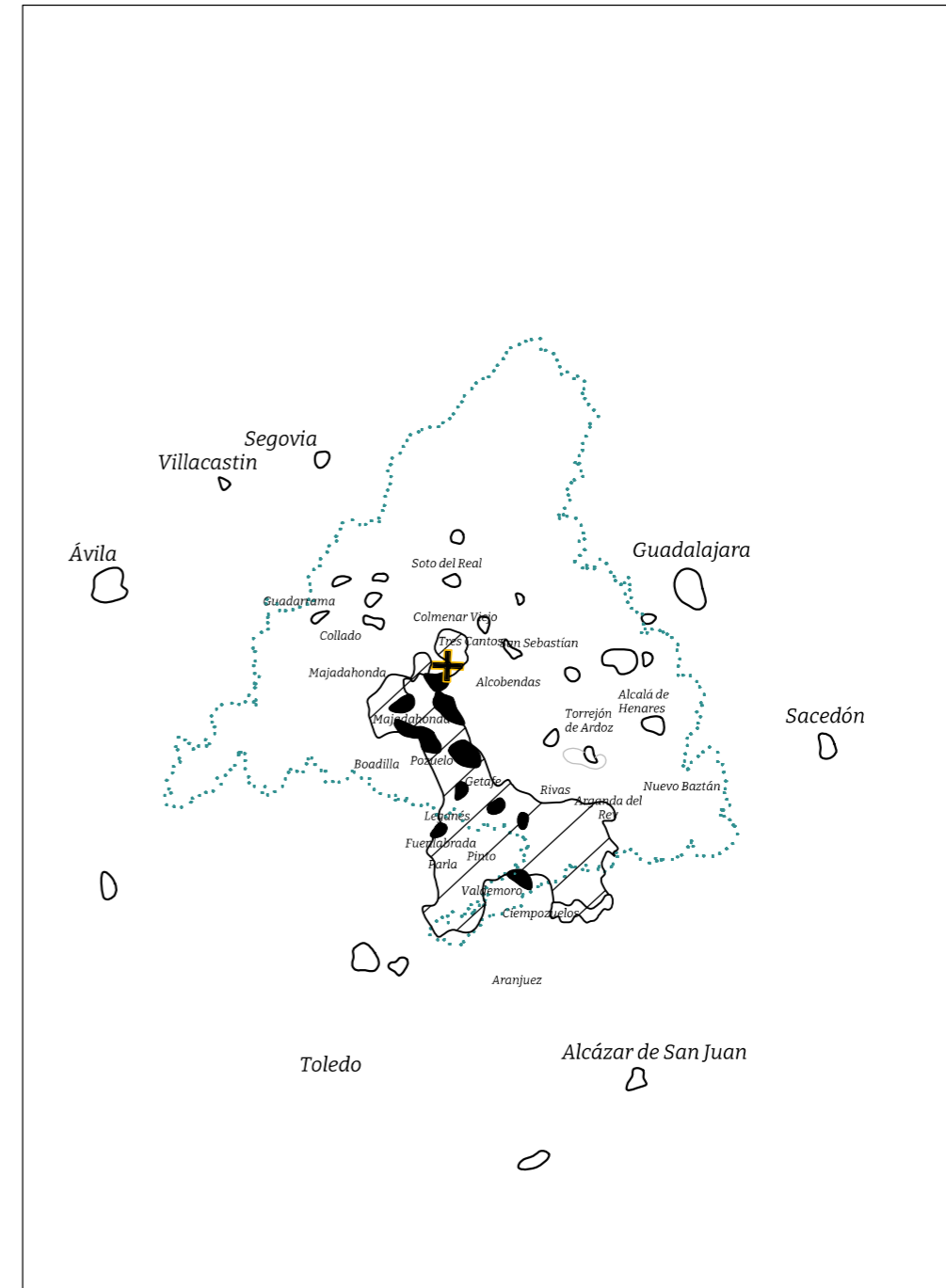


Fig 29. Clasificación de red en cultivo 3



- Núcleos de población >3.5km² finales
- Núcleos de población >3.5km² no alcanzados
- ▨ Presencia en toda la superficie
- ▩ Presencia en toda la superficie en caminos de búsqueda inconclusa
- Rutas principales
- - - Rutas secundarias
- Rutas de búsqueda inconclusa
- ✚ Punto de partida
- Delimitación CAM

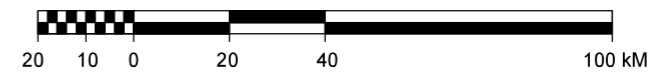


Fig 30. Clasificación de red en cultivo 4

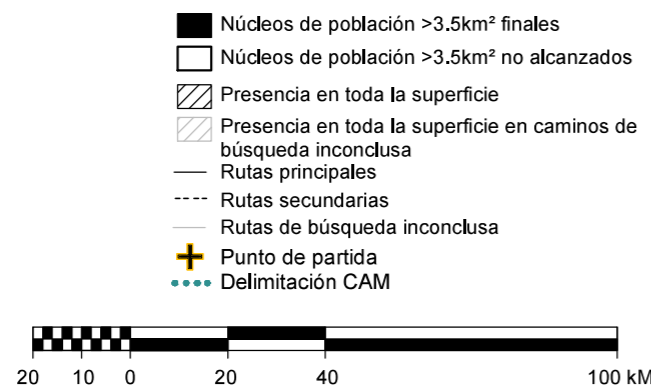
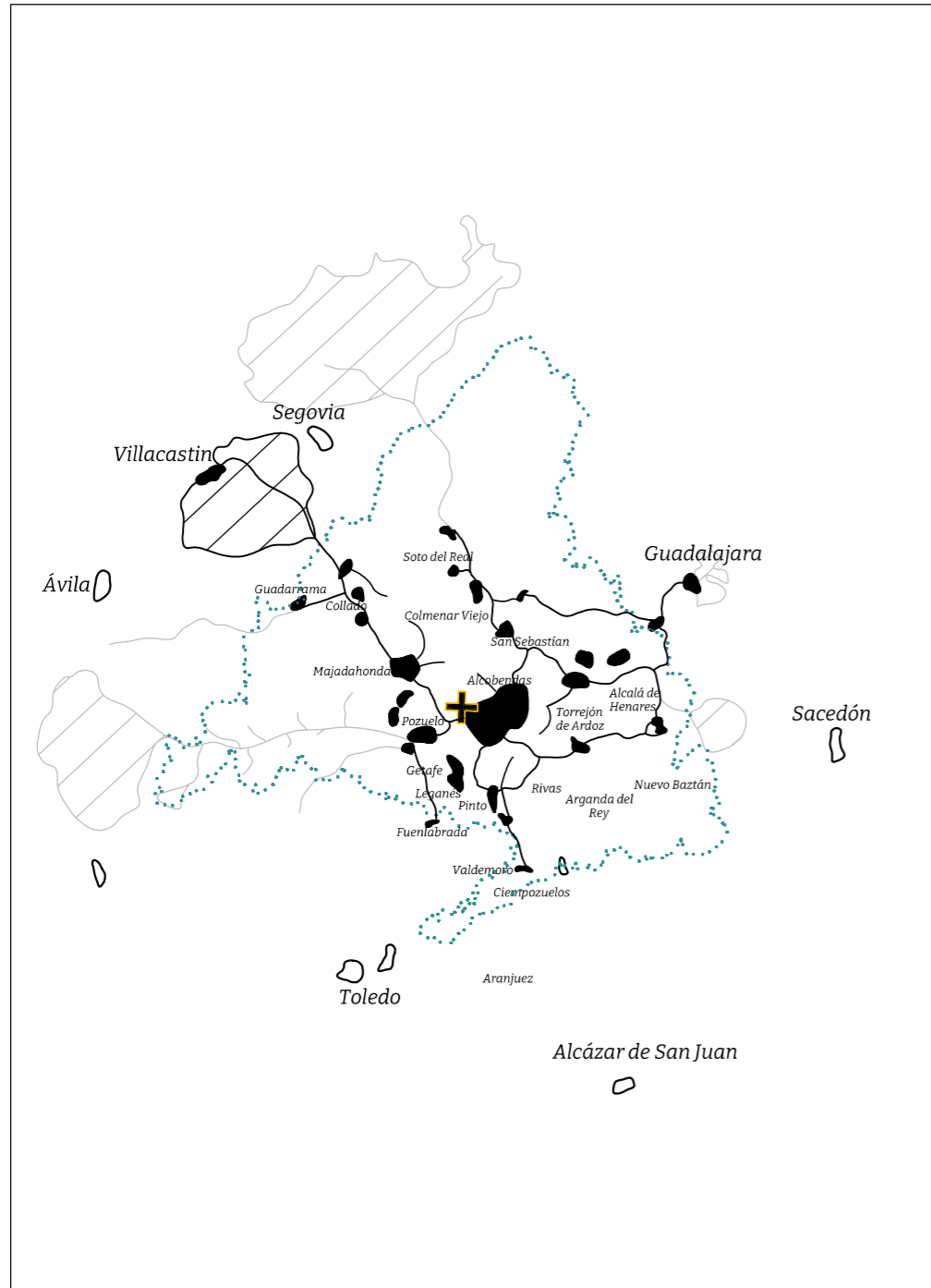


Fig 31. Clasificación de red en cultivo 5

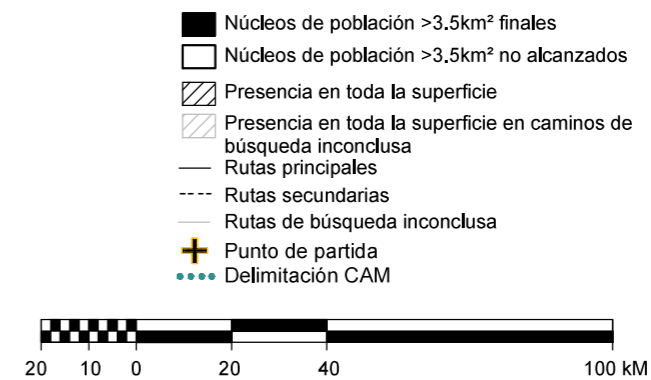
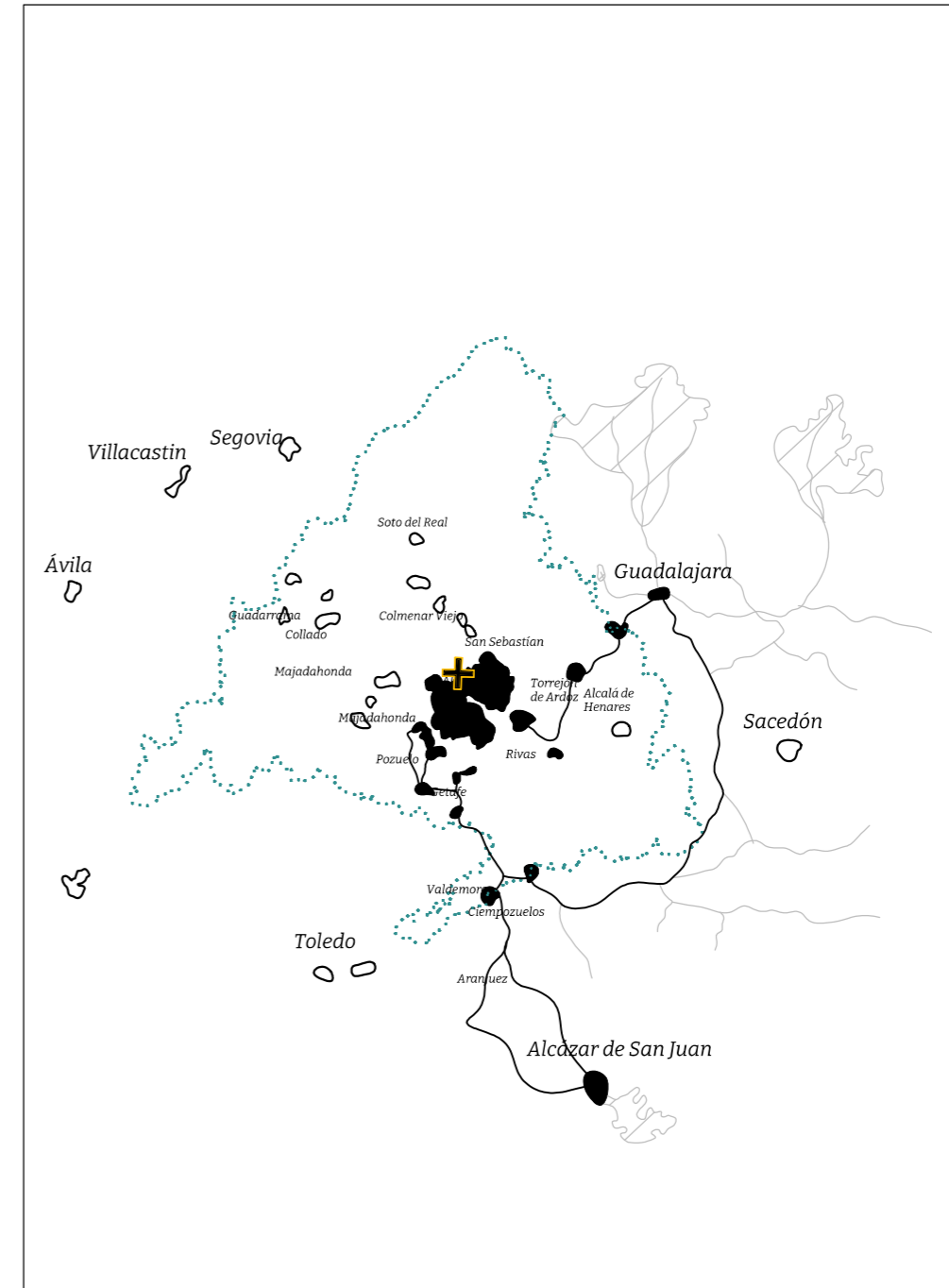


Fig 32. Clasificación de red en cultivo 6

placa de acetato 13 x 18cm

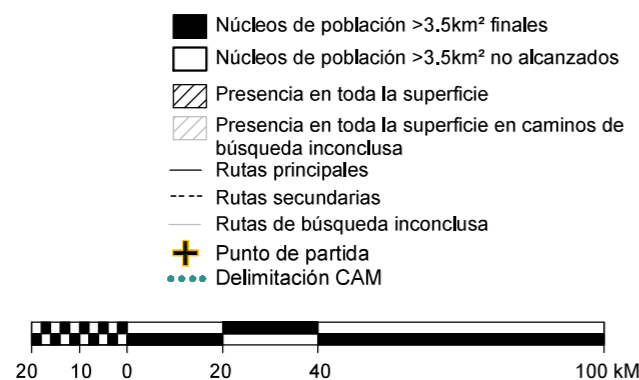
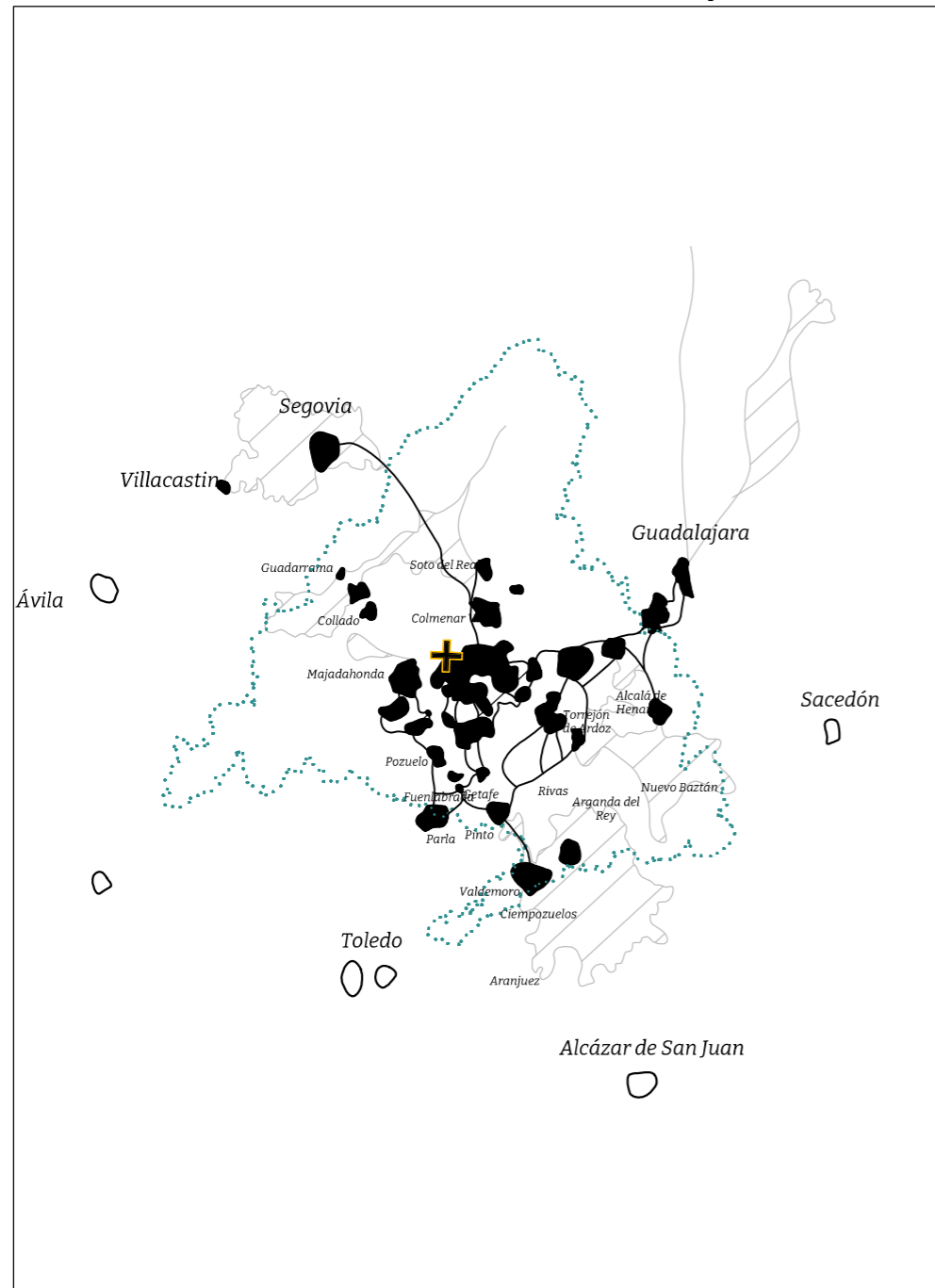


Fig 33. Clasificación de red en cultivo 7

Aprendizaje empírico: cambios en la metodología

De estos intentos previos, y a través de la investigación en paralelo, se aprendió que las variables que primordialmente afectan a Physarum en su cultivo en casa son la posibilidad de mantener la humedad, la cantidad de alimento presente en la placa, y la luz inducida. La falta de alimento produciría el paso a la fase de esclerocio, y algunos cultivos sugirieron que también el medio inapropiado, demasiado seco, podría producir la formación del esclerocio. El paso a su esporulación sería causado por un exceso de luz, o bien falta de alimento.

Por otro lado, la experimentación en P7 fue crítica para identificar las manchas verdes emergentes en la placa de agar como una posible invasión por otro moho. A pesar de indagar sobre esto, fue difícil encontrar información científica y fidedigna sobre este suceso, pero a través de la consulta con proveedores y otros investigadores de poca experiencia, se obtuvieron ciertas recomendaciones que fueron aplicadas.

En este momento, se decidió obtener material específico para el cultivo de Physarum: placas Petri de vidrio. Tras esto, y la esterilización de todos los materiales posibles, se procedió al cultivo con una metodología similar, aunque en esta ocasión se procuró no colocar toda la avena en los puntos determinados, si no que se fue colocando a medida que Physarum fue acercándose a ellos, asumiendo el que moho verde que aparecía en las placas fue ocasionado por la pudrición de la avena sobre la capa de agar húmedo, a medida que pasaban los días y Physarum no las ingería. Además, en el traslado de Physarum en estado de plasmodio a la placa de Petri definitiva, se trató de escoger una parte del plasmodio con una estructura tubular muy desarrollada y de tubos gruesos, y una vez trasladado, se retiró el trozo de agar donde antes descansaba Physarum, para no favorecer la pudrición de la avena que pudiera existir ahí.

Esto supuso una notable mejora en los siguientes cul-

tivos, en los que el organismo de aquí en adelante fue capaz de encontrar todas las fuentes de alimento y tejer una red (Fig. 34), que si bien estuvo en constante cambio hasta el final, surgió tras la búsqueda de alimento de Physarum de la mayor parte de la superficie. Estos cultivos son:

- Experimento P8 (13/11- 19/11)
- Experimento P9 (13/11- 19/11)
- Experimento P10 (13/11- 19/11)
- Experimento P11 (13/11- 19/11)
- Experimento P12 (13/11- 19/11)

Y a continuación se presentan imágenes y dibujos analíticos de estos.

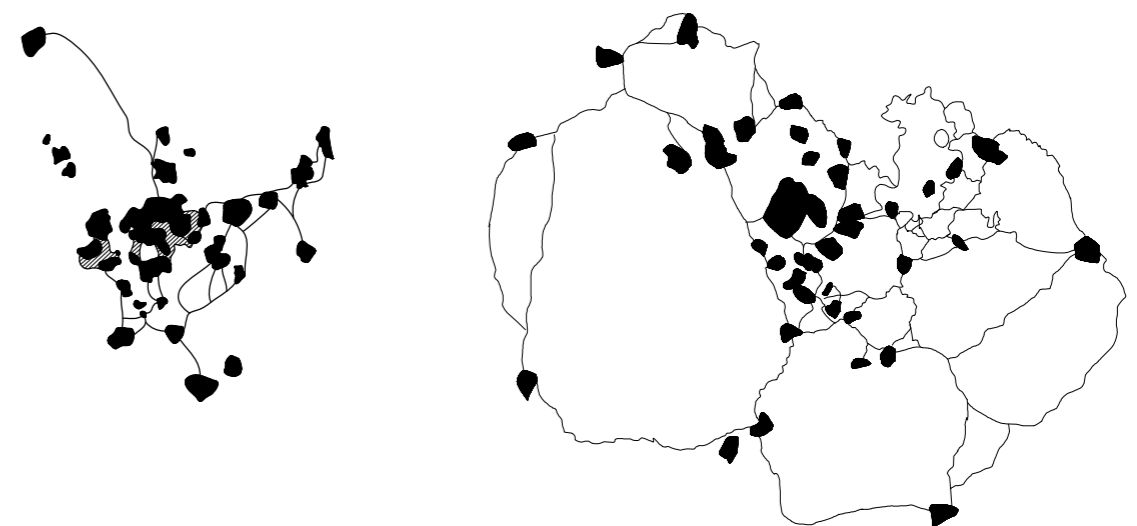


Fig 34. Comparación de P7 y P8. Redes principales

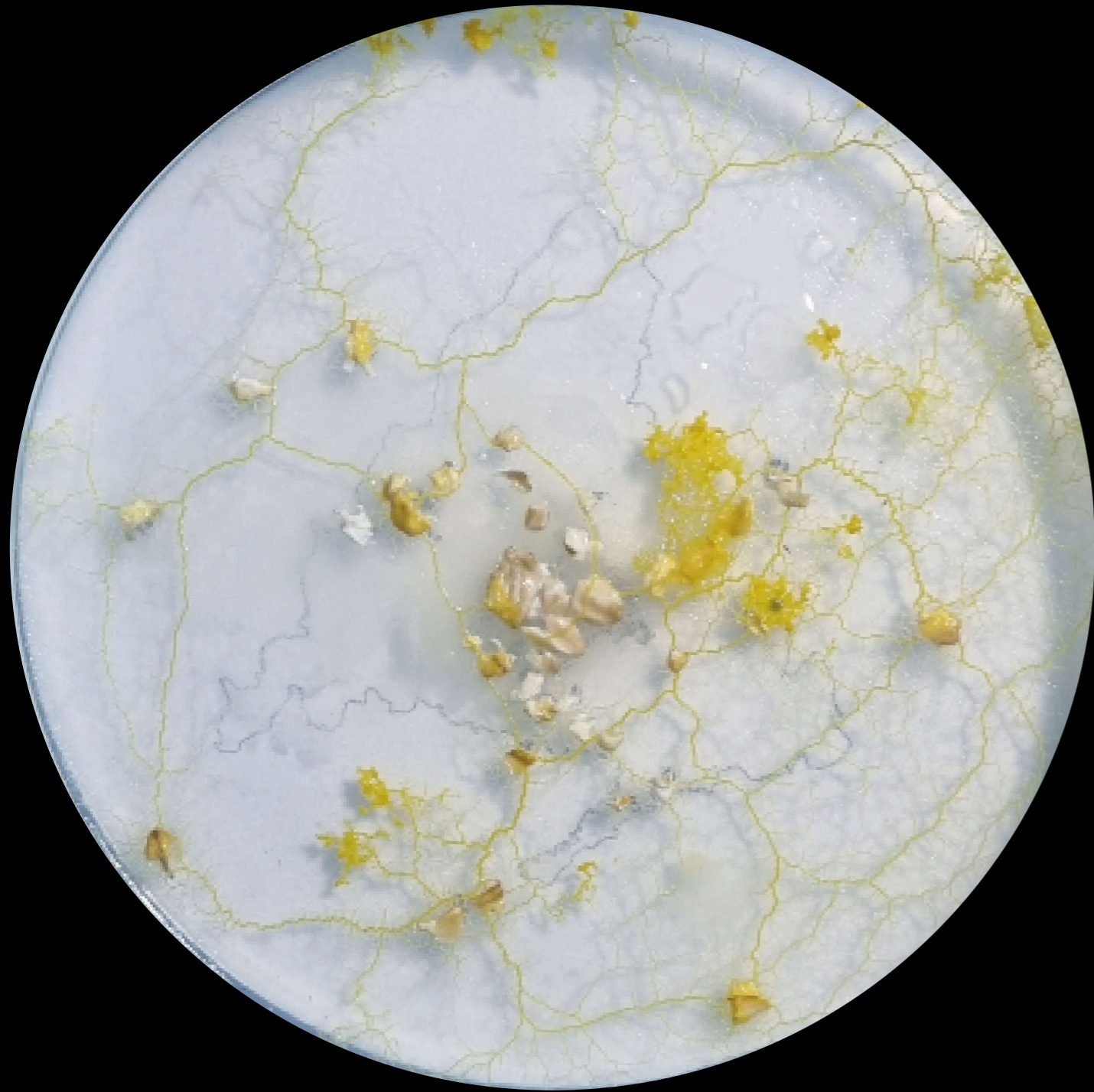
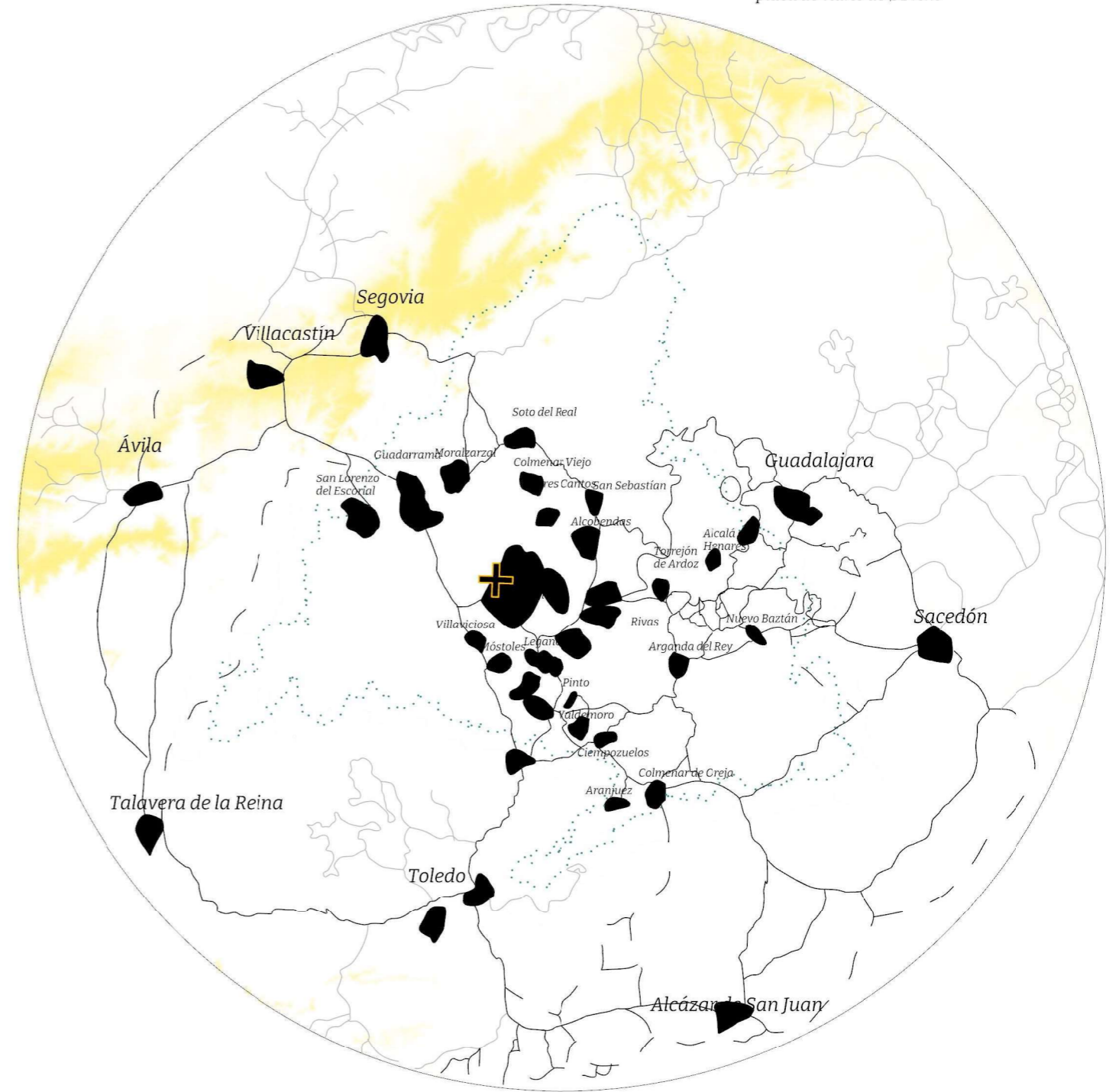


Fig 35. Fotografía de red en cultivo 8

placa de vidrio de Ø14cm



- Obstáculos
- Núcleos de población >3.5km² finales
- Presencia en toda la superficie
- Rutas principales
- Rutas secundarias
- Rutas de búsqueda inconclusa
- Punto de partida
- Delimitación CAM

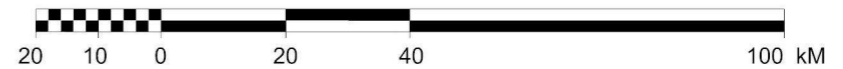


Fig 36. Clasificación de red en cultivo 8



Fig 37. Fotografía de red en cultivo 9

placa de vidrio de Ø14cm

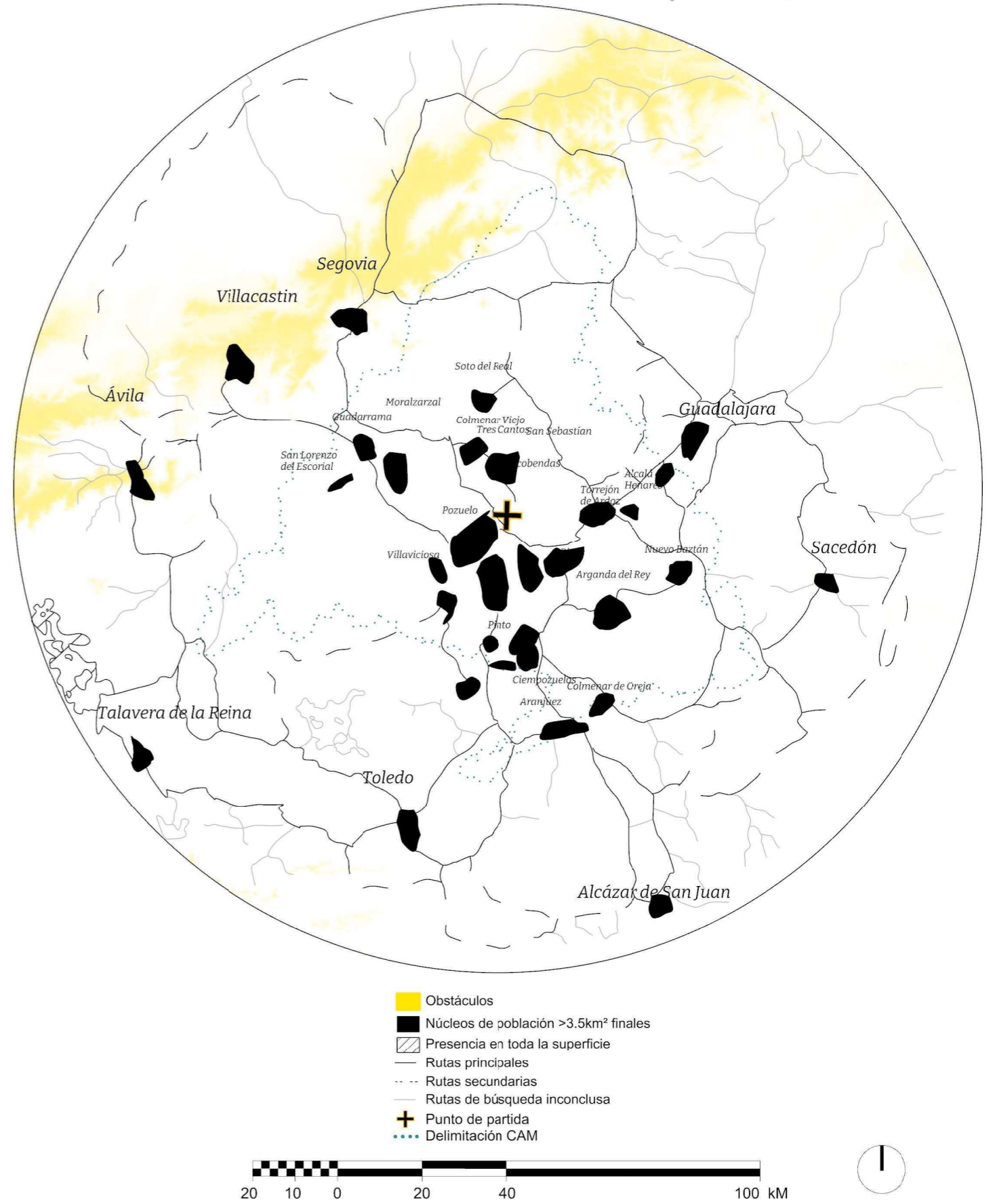


Fig 39. Clasificación de red en cultivo 9



Fig 40. Fotografía de red en cultivo 10

placa de vidrio de Ø14cm

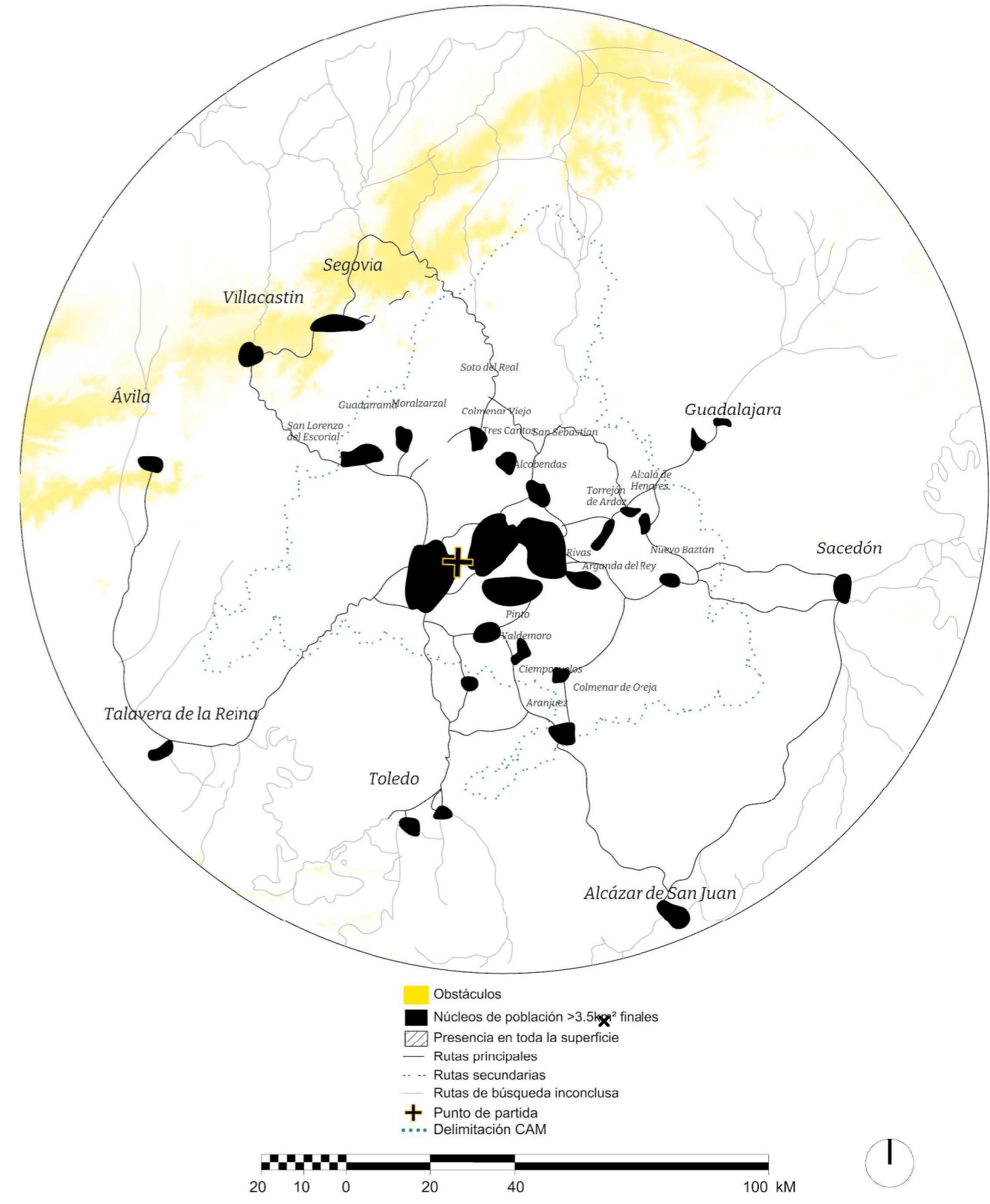
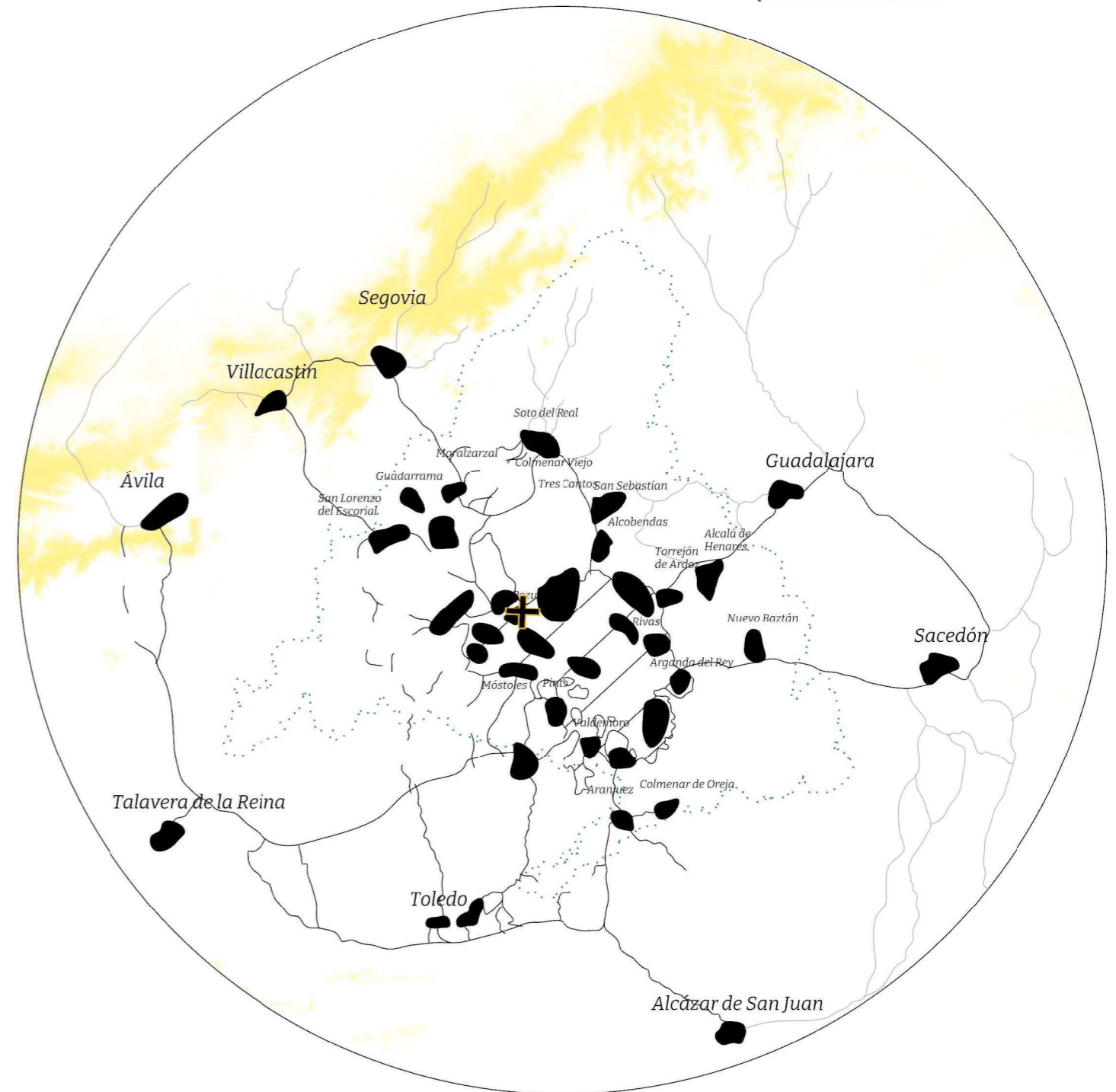


Fig 41. Clasificación de red en cultivo 10



Fig 42. Fotografía de red en cultivo 11

placa de vidrio de Ø14cm



- Obstáculos
- Núcleos de población >3.5km² finales
- Presencia en toda la superficie
- Rutas principales
- Rutas secundarias
- Rutas de búsqueda inconclusa
- Punto de partida
- Delimitación CAM

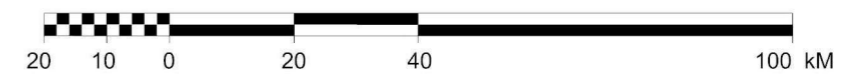
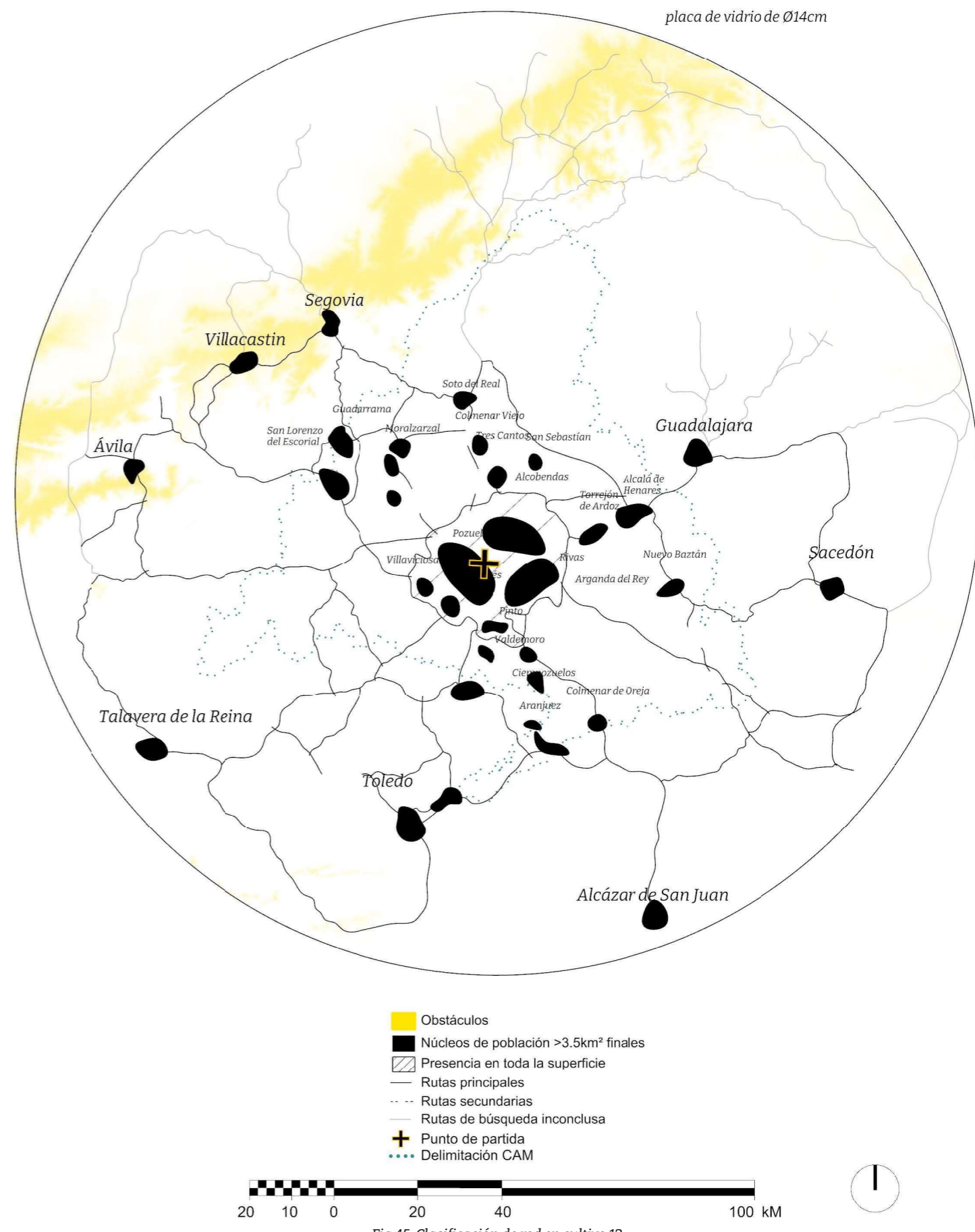
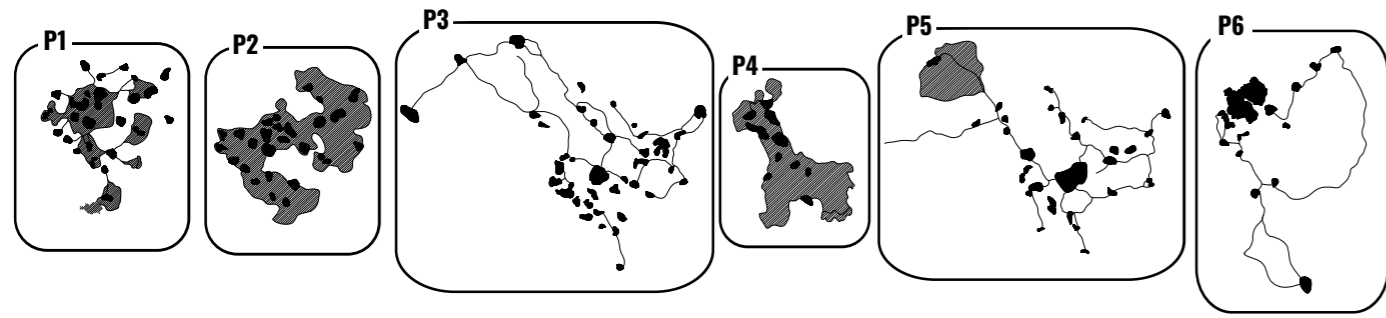


Fig 43. Clasificación de red en cultivo 11



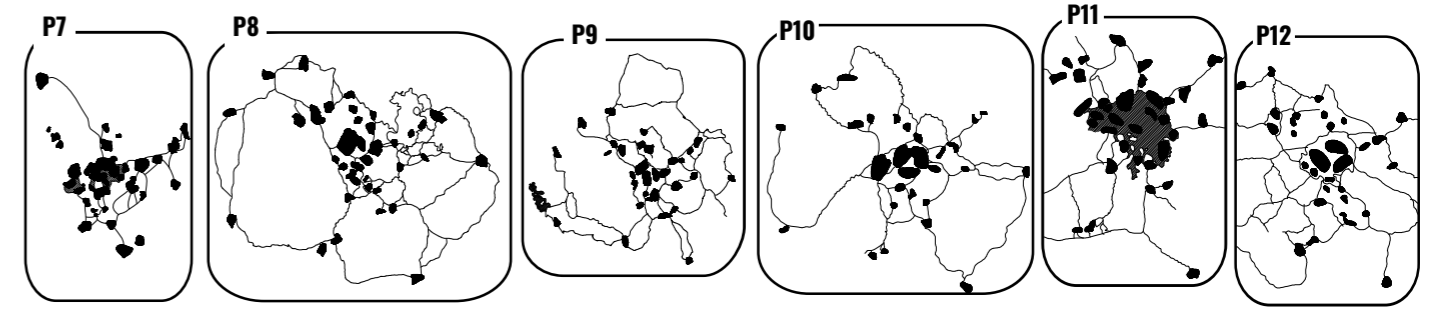
Fig 44. Fotografía de red en cultivo 12





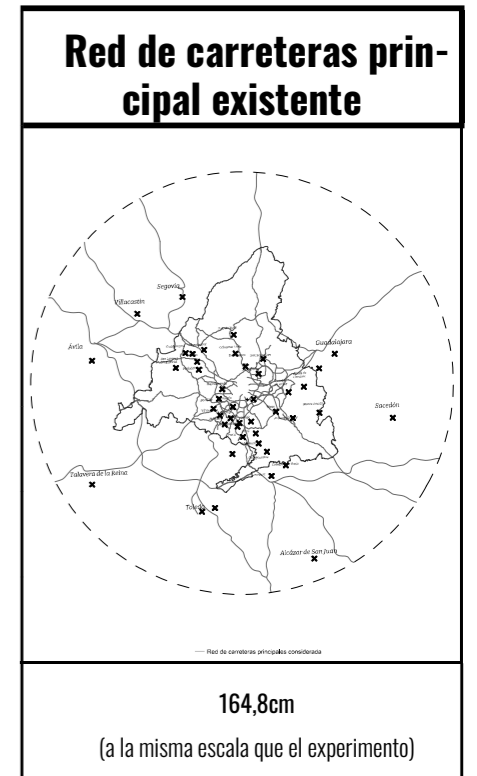
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
CARACTERÍSTICAS Y MEDIDAS DE LA PLACA (cm)	polipropileno Ø14			13 acrílico 18		
SUPERFICIE DE PLACA (cm²)	153,9	234	234	234	234	234
Nº DE NÚCLEOS EXISTENTES	45					
Nº DE NÚCLEOS ALCANZADOS	30	28	38	9	28	14
LONGITUD DE 'CAMINOS PRINCIPALES' (cm)	x	x	32	x	24,6	19,6
SUPERFICIE DE OCUPACIÓN DE RED PRINCIPAL (cm²)	5,82	9,86	x	5,6	2,37	x
LONGITUD DE 'CAMINOS SECUNDARIOS' (cm)	x	x	x	x	x	x
MÍNIMO GROSOR DE CAMINOS PRINCIPALES (mm)	x	x	0,45	x	0,43	0,94
TIEMPO HASTA ESTADO 'ESTABLE' (h)	27	42	92	49	111	35
PRESENCIA DE OBSTÁCULOS (h de luz)	x	x	x	x	x	x
COMPLICACIONES	Esclerocio		Esporulación	Esporulación + esclerocio	Esporulación	

Fig 46. Tabla de mediciones de cada experimento. Estos datos son informativos y no son objeto de análisis o de comparación con la red de carreteras de Madrid, debido a la diferencia de escala. Se miden las siguientes variables en cada experimento: la longitud de las redes (cm) de los caminos principales, el tiempo hasta "punto estable" (h), que se decide este tiempo cuando Blob haya alcanzado todos los puntos con presencia de alimento, y se le hayan aplicado

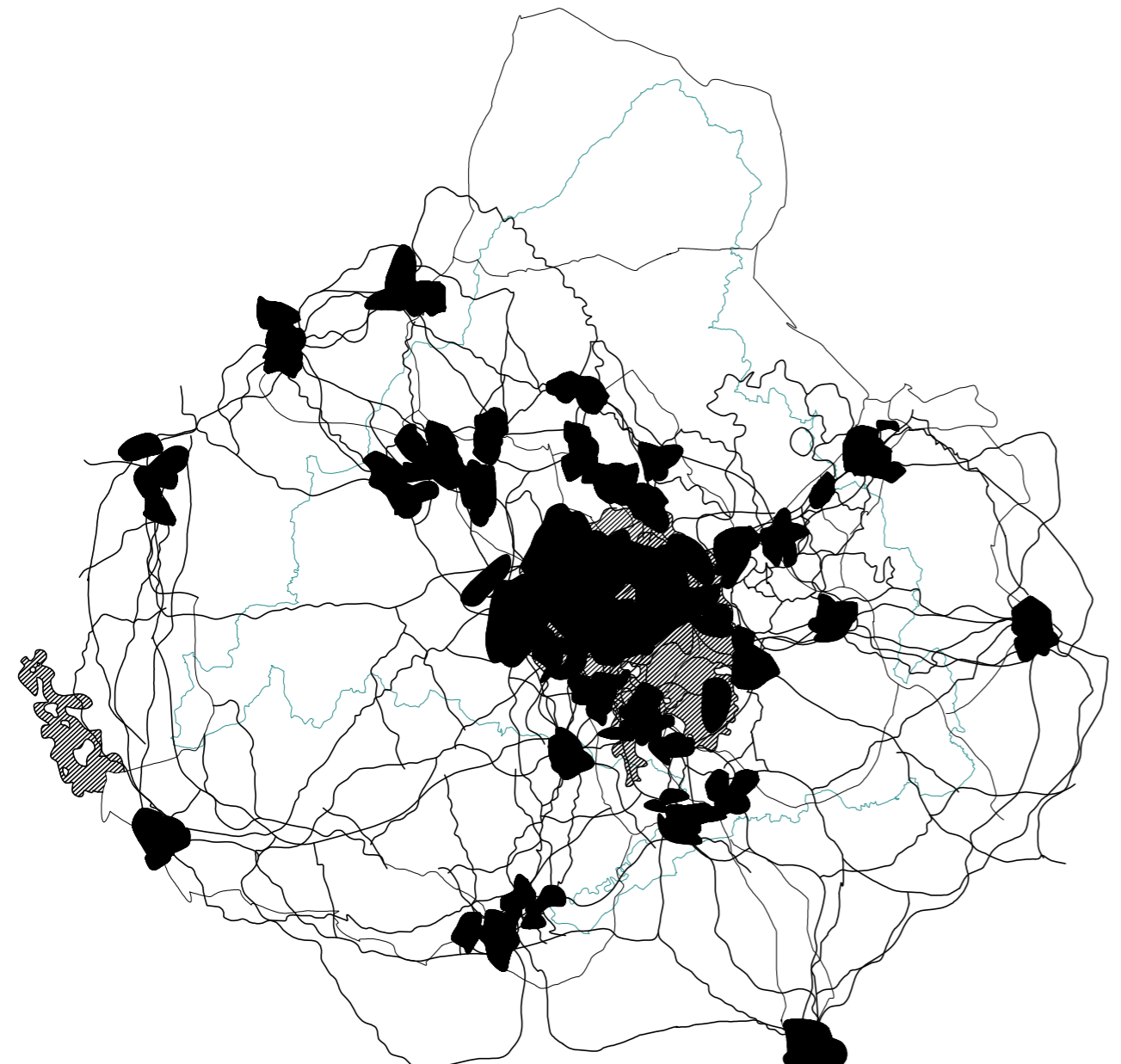


	P7	P8	P9	P10	P11	P12
CARACTERÍSTICAS Y MEDIDAS DE LA PLACA (cm)	13 acrílico 18			Ø14 vidrio		
SUPERFICIE DE PLACA (cm²)	234	153,9	153,9	153,9	153,9	153,9
Nº DE NÚCLEOS EXISTENTES	45					
Nº DE NÚCLEOS ALCANZADOS	31	45	45	45	45	45
LONGITUD DE 'CAMINOS PRINCIPALES' (cm)	21,9	87,7	98,6	60,6	63,7	98,9
SUPERFICIE DE OCUPACIÓN DE RED PRINCIPAL (cm²)	x	2,42	x	x	2,98	2,09
LONGITUD DE 'CAMINOS SECUNDARIOS' (cm)	x	39,5	44,8	2,9	16,7	3,9
MÍNIMO GROSOR DE CAMINOS PRINCIPALES (mm)	0,62					
TIEMPO HASTA ESTADO 'ESTABLE' (h)	81	165	98	104	86	76
PRESENCIA DE OBSTÁCULOS (h de luz)	x	3	3	3	3	3
COMPLICACIONES	Esporulación	x	x	x	x	x

3h de luz. En caso de no haber llegado a este estado, como en los experimentos P1-P7, se decide el último estado de Blob antes de morir, el número de núcleos conquistados: el número de puntos de alimento que alcanza Blob, en caso de no alcanzarlos todos.



Se deciden superponer los resultados de las 'redes principales' de P8, P9, P10, P11, y P12, en busca de un patrón existente, y se concluye que su definición sería poco acertada debido a la complejidad y la dispersión de los resultados., aunque sí se identifican áreas con menos presencia de red.



- Núcleos de población >3.5km² finales
- ▨ Presencia en toda la superficie
- Rutas principales
- Delimitación CAM

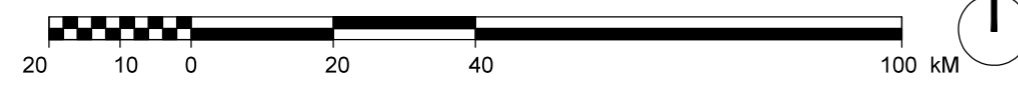
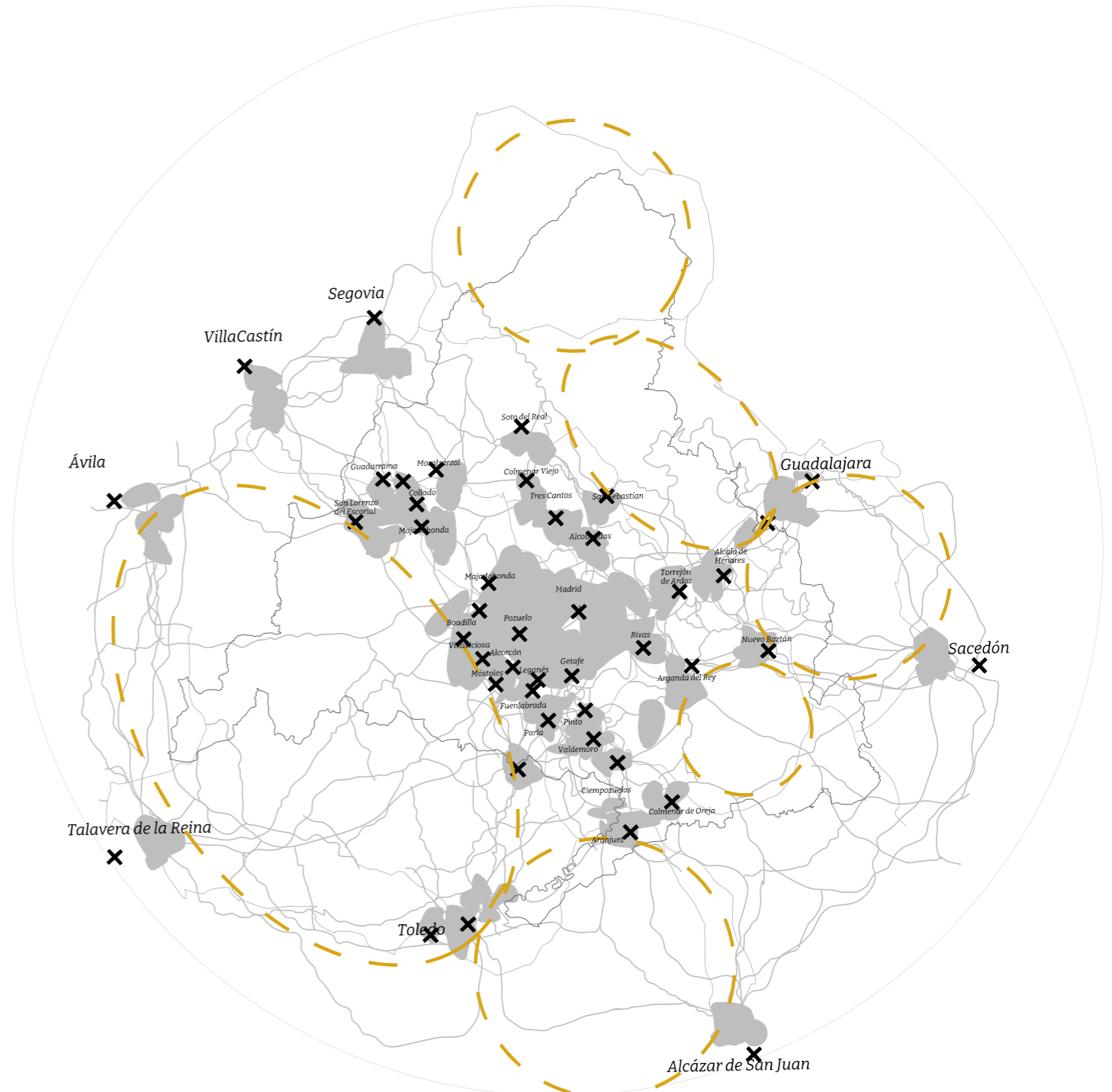


Fig 47. Clasificación de red en cultivo 12

Estas áreas de mayor 'vacío' se representan a continuación, y se tienen en cuenta de cara a las conclusiones



- Rutas principales solapadas de experimentos P8 a P13
- - - Área de mayor vacío aproximada
- Delimitación CAM



Fig 48. Clasificación de red en cultivo 12

5.2. RED MEDIANTE SOFTWARE

Objetivo

Elaborar con la simulación computarizada de Physarum un tejido urbano propositivo de la red urbana de transporte de Madrid, que bien podría ser eficiente o no. Analizar este tejido en tanto que sea posible.

Comparar, si es posible, la red urbana de transporte de Madrid y aproximadamente 100 km a la redonda teniendo en cuenta la red principal de carreteras, con las redes elaboradas por Physarum en su cultivo.

Metodología

Se simulará el crecimiento de Physarum a través de Physarealm, extensión de Grasshopper. Se intentará buscar un patrón en los resultados de la simulación, para posteriormente ser comparado con la red de carreteras principal de Madrid. En este procedimiento no se podrán tener en cuenta obstáculos debido a que Physarealm no trabaja con ellos de manera correcta en 2D, es decir, no se podrá tener en cuenta el terreno.

Para realizar las simulaciones, se irán probando distintos parámetros de ajuste, de manera que los parámetros finales fueron ajustándose para conseguir una red de conexiones lo más proporcionada posible. Es decir, para que los agentes definieran caminos marcados en vez de dispersarse demasiado, lo que puede suceder utilizando los parámetros inadecuados.

En la simulación 1, se parte de unos parámetros de referencia, y la simulación final se considera el resultado final obtenido.

En la simulación 1, se representa un punto estable, decidido a través de la observación de la simulación, y en ella se dibujan un conjunto de líneas que significan las uniones de los agentes que se encuentran a un radio que 2, a través del comando Population Interconnect, donde $detr=2$

En la simulación final, se representa también un punto estable, decidido a través de la observación de la simulación, y en ella se dibujan un conjunto de líneas que significan las uniones de los agentes que se encuentran a un radio que 5, a través del comando Population Interconnect, donde $detr=5$.

Breve introducción a Physarealm

Como se ha mencionado antes, el algoritmo de Jones fue el primer algoritmo estigmérico multi-agente.

La forma en la que estos agentes se expanden está determinada por su rango de sensibilidad, en el que se sienten atraídos por quimioatractantes. La manera en la que sienten estos, está parametrizada con el siguiente mecanismo:

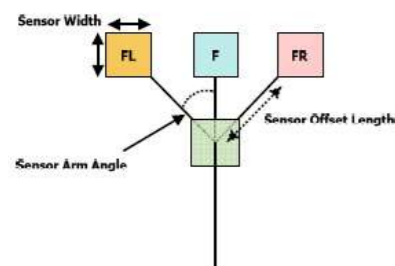


Fig 49. Morfología del sensor de Jeff Jones.

El agente, posicionado en el cuadrado verde, posee antenas sensitivas (F, FR y FL). Si F detecta más quimioatra-

yentes que FL o FR, el agente continuará su camino por la misma dirección. En cambio, si FL los detecta con mayor intensidad, se girará en esa dirección, así como pasará con FR.

Por otro lado, SA (Sensor Arm Angle), SO (Sensor Offset) y SW (Sensor Width) son parámetros que podemos controlar en este proceso, aunque también son ajustables, el tamaño de la población inicial (%p), el tamaño del paso del agente (SS, Step Size), el ángulo de rotación del agente (RA, Rotation Angle) y la tasa de deposición del camino (depT, trail deposition rate).



Fig 50. Difusión química de cada agente, en línea recta, de Jeff Jones.

Physarealm es un software desarrollado a partir de este algoritmo, aunque con ciertas modificaciones, de las cuales las más destacables son:

1. Physarealm traslada el algoritmo de Jones al espacio en 3 dimensiones
2. En Physarealm el mecanismo de detección es a través de sensores en una esfera alrededor del agente. La posición de estos es determinada por los siguientes parámetros:

Gracias a estos parámetros, los agentes dentro del programa podrán tener comportamientos de los siguientes tipos:

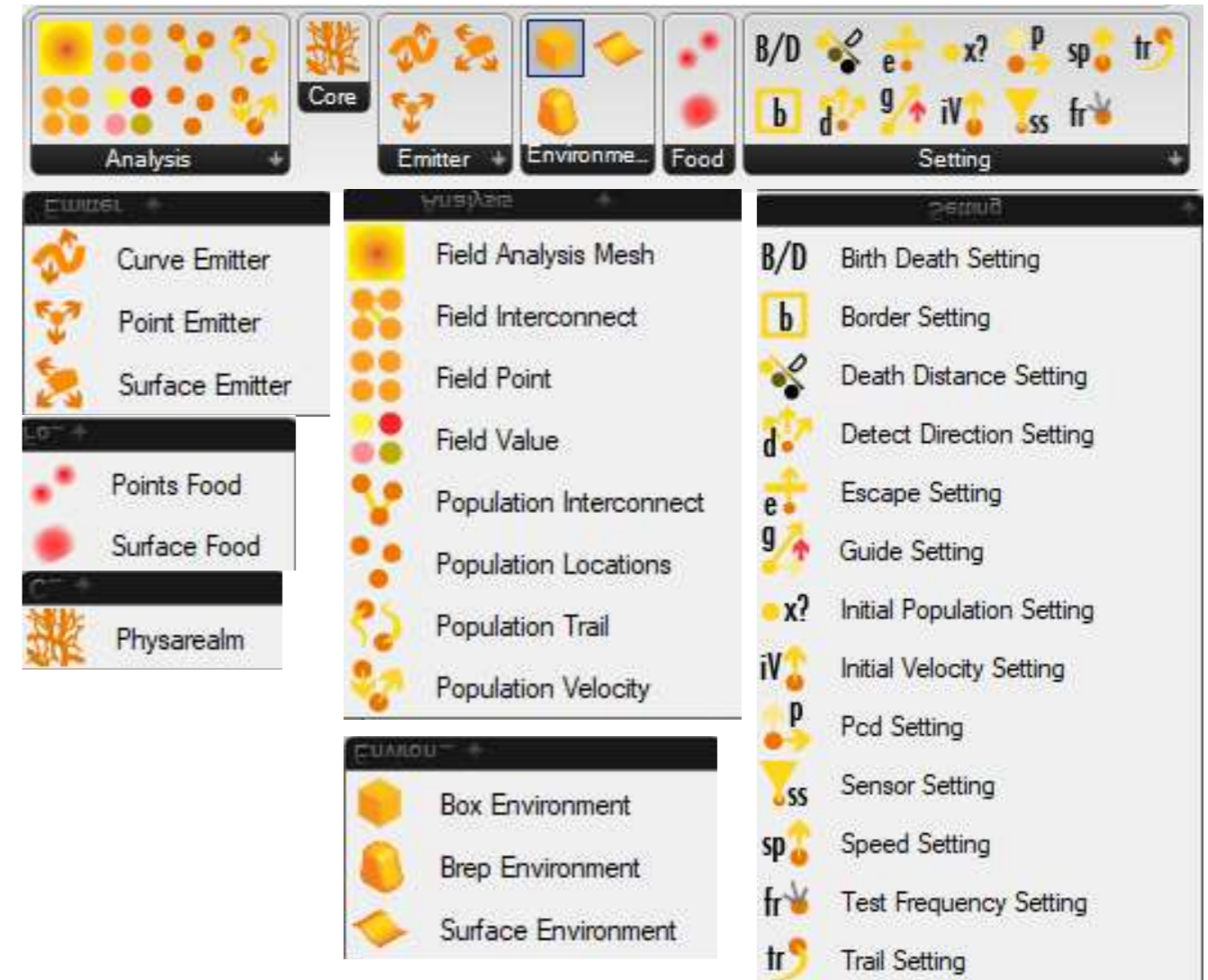
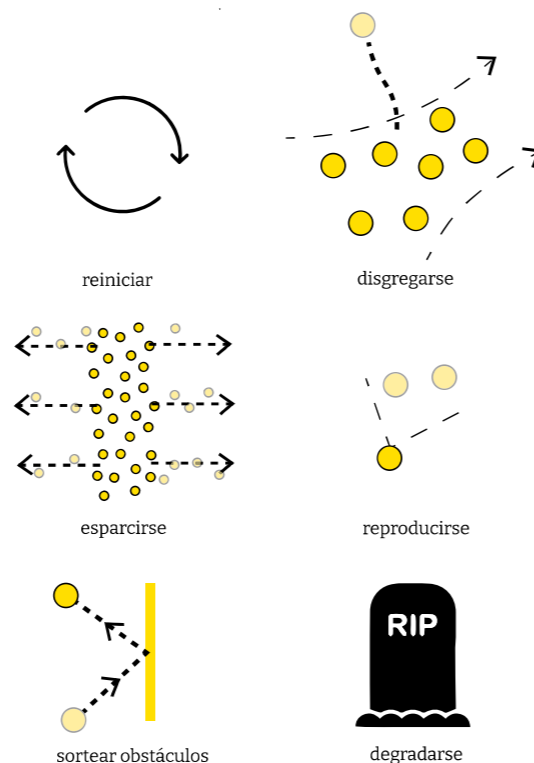


Fig 51. Comandos de Physarealm

Parámetros utilizados: simulación final

Estos parámetros fueron ajustándose para conseguir una red de conexiones lo más proporcionada posible. Es decir, para que los agentes definiera caminos marcados en vez de dispersarse demasiado, lo que puede suceder utilizando los parámetros inadecuados en Physarealm, al igual que en el algoritmo de Jones, quien ilustra algunos casos de minimización de redes errónea a través de diferentes métodos en *The Emergence and Dynamical Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level Behaviours*. Physarealm, sin embargo, no es capaz de realizar diferentes métodos de operación del algoritmo, por lo que no se tendrán en cuenta las consideraciones de este artículo.

Las redes tanto del algoritmo de Jones como de Physarealm no siempre quedarán minimizadas, y dada la naturaleza propositiva de este trabajo, no será objetivo primordial comprobar esto, pero sí se tratará de hacer una red que no caiga en el exceso, es decir, una red en la que los agentes invaden todo el área de movimiento, o en la decadencia, siendo una red que desaparece. También, ha sido observado a través de la primera simulación que la presencia de muchos nodos de atracción concentrados en un solo lugar del medio, puede derivar en el detenimiento del crecimiento, o en el exceso de agentes presentes, posiblemente creando lo que llamaría Jones un 'nodo de atracción fuerte', lo que impide que se produzca la minimización de la red.

De esta manera, en la simulación 2 se tienen en cuenta menos nodos de atracción (Fig 53)

Otro trabajo que se tomó como referencia fue *Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla: A Perspective from Grasshopper*, donde se elabora un tejido urbano a partir de Physarealm. En este trabajo se integran dos variables más que ayudan a la definición de una red más proporcionada, que serán:

- 1: Una mayor detección de los agentes de la dirección del resto (DDirSets = 0-2)
- 2: Una menor posibilidad de dispersión que la establecida por defecto (PCD=0,005)

Estos parámetros ayudaron Con estos parámetros establecidos, se realizará una segunda simulación (Fig. 54).

Parámetros de Physarealm

En Physarealm es posible simular el crecimiento de Physarum a través del algoritmo multiagente de Jones modificado. Los siguientes parámetros son imprescindibles para simular este movimiento:

- **Emitter:** que bien puede ser un punto, una curva o una superficie. Desde esta ubicación o ubicaciones se generarán los agentes iniciales.

- **Food:** pueden ser puntos o superficies, a los que los agentes se verán atraídos.

- **Environment:** será el medio en el que los agentes se podrán encontrar.

- **Core:** representa a Physarum, y es capaz de recoger los anteriores datos como inputs, y generar el crecimiento a través de agentes.

Se podrá, también, definir ciertos parámetros del crecimiento de la simulación, como serán los siguientes:

- **Vertical Guide Factor (VGF):** Parámetro que afecta al movimiento del agente en sentido vertical.

- **Initial Velocity (IV):** parámetro que determina la velocidad de los agentes iniciales.

- **Probability of Escape (EscP):** Parámetro que determina la posibilidad de los agentes de saltar obstáculos. Hasta el momento, Physarealm no es capaz de colocar obstáculos en 2D.

- **Speed Setting:** Determinará la velocidad máxima a la que los agentes pueden moverse.

- **Death Distance Setting:** Determinará la distancia a la que morirá un agente si se encuentra separado de los demás.

- **Sensor Setting:** determinará el máximo ángulo al que se sitúan las antenas sensitivas (SA), el ángulo al que rotarán los agentes al detectar atrayentes (RA) y la máxima distancia a la que el agente puede percibir estos atrayentes (SO).

- **Detect Direction Setting:** servirá para definir

- **B/D Setting:** servirá para determinar a un radio detección (DvR = Birth distance radius) en el que en un rango de número de agentes (desde DvMin hasta DvMax), nacerán nuevos agentes, y de manera similar con la eliminación de agentes, servirá para determinar a un radio detección (DeR = Death distance radius) en un rango distancia entre agentes (desde DeMin hasta DeMax)

Parámetros utilizados: simulación 1

Se toman parámetros iniciales, y como rango de referencia se utiliza el trabajo de Sena Kaynarkaya de la Universidad Técnica de Estambul, donde se evalúa una línea de metro con Physarealm. Se toman, por lo tanto, los siguientes parámetros iniciales para la primera simulación (Fig: 51)

Table 6: Factors of simulation 7.

B/D Setting	Speed Setting	Death Setting	Distance	Sensor Setting	Detect Setting	Direction
DvR=1						
DvMin=0				SA=22.5		
DvMax=1	Max			RA=45	DDirR=0.05	
DeR=3	Speed=3	Death Distance=9		SO=10	DDirP=0.05	
DeMin=1						
DeMax=10						

Fig 52. Tabla de variables de la simulación final extraída de *Evaluation of Metro Lines with Swarm Intelligence Approach*

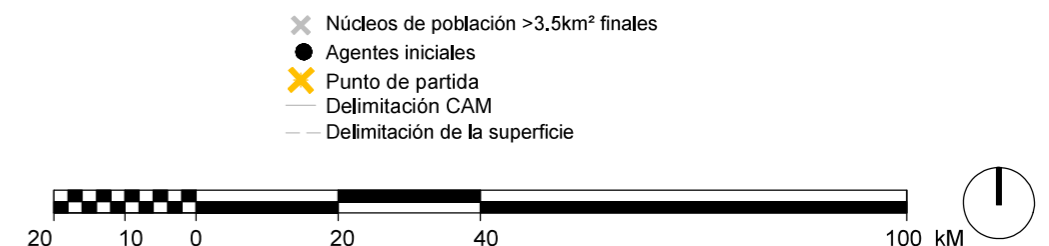
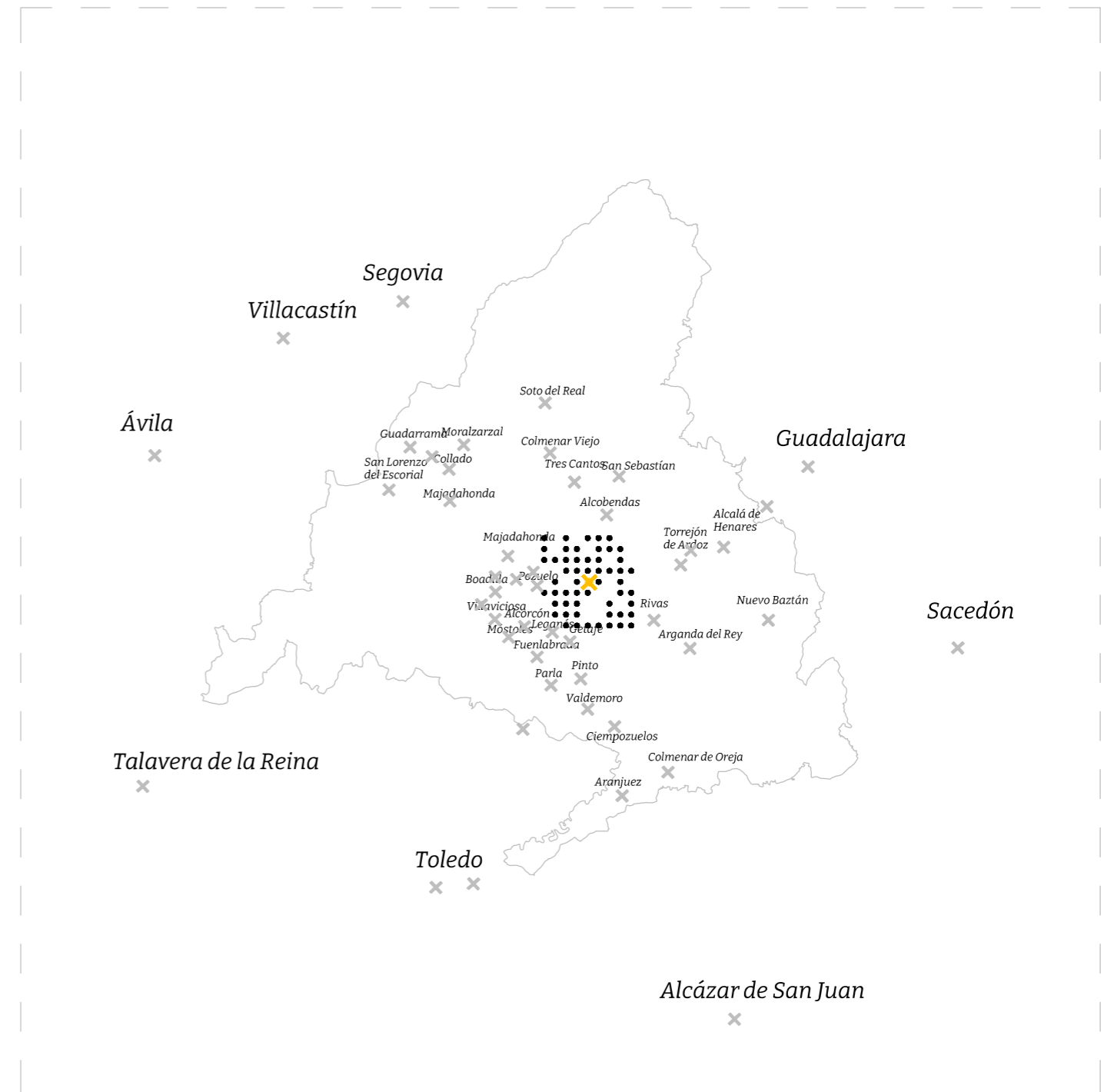


Fig 53. Estado inicial de la simulación 1

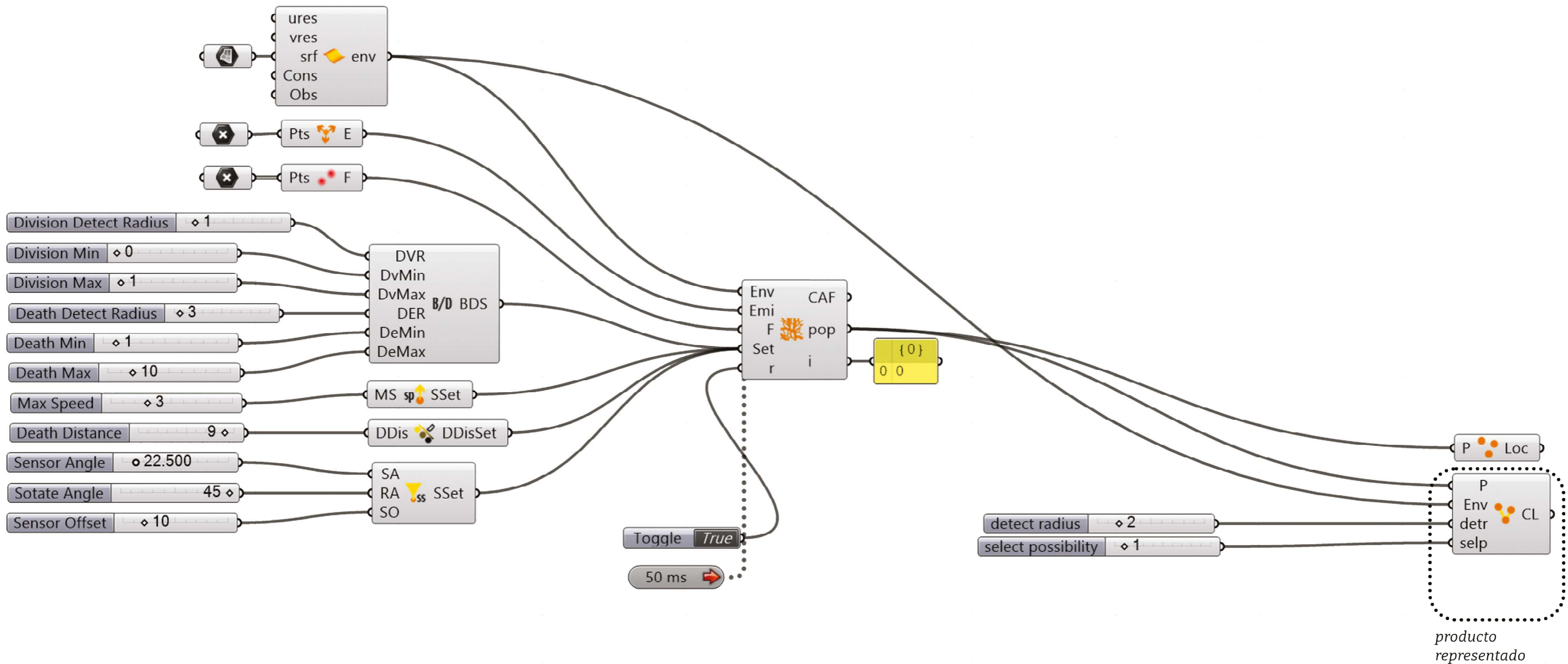


Fig 55. Parámetros de Physarealm utilizados en la simulación 1

Simulación 1



Fig 56. Proceso de crecimiento de simulación en Physarealm, simulación 1

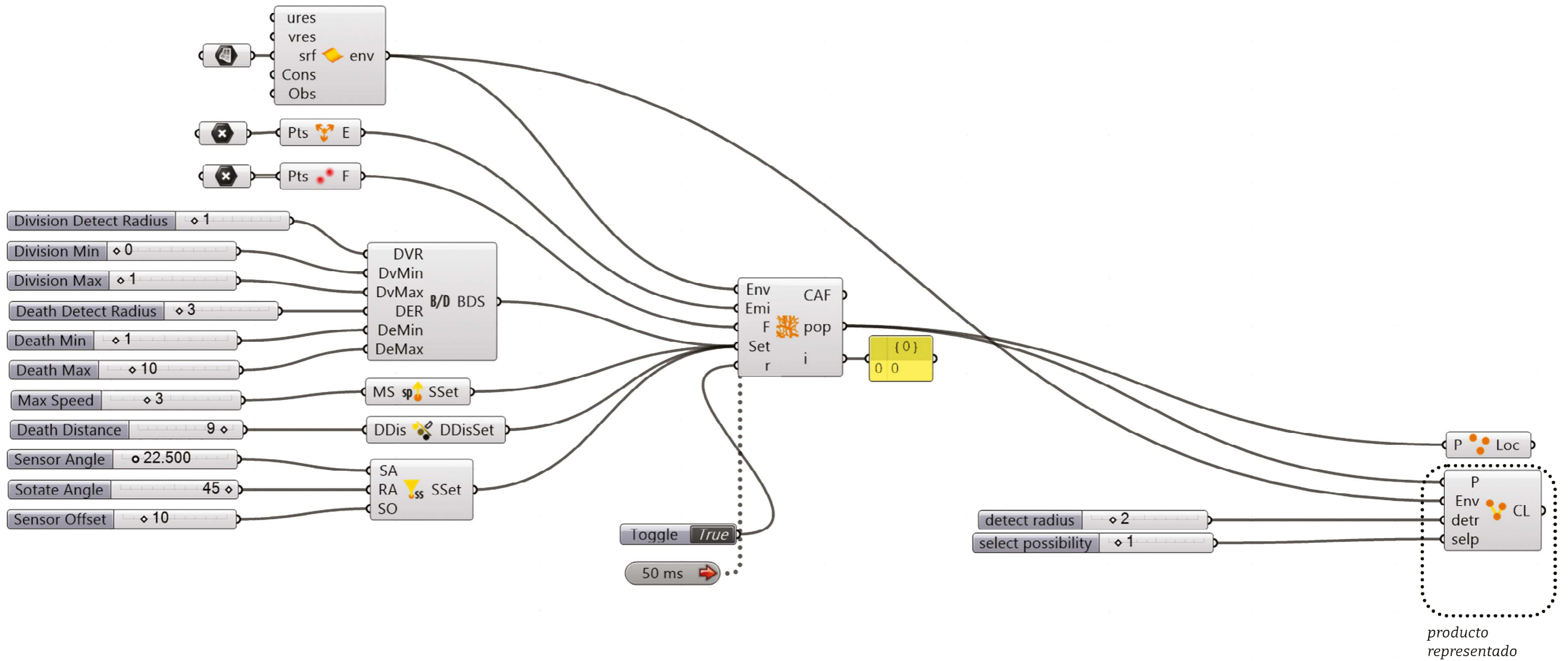
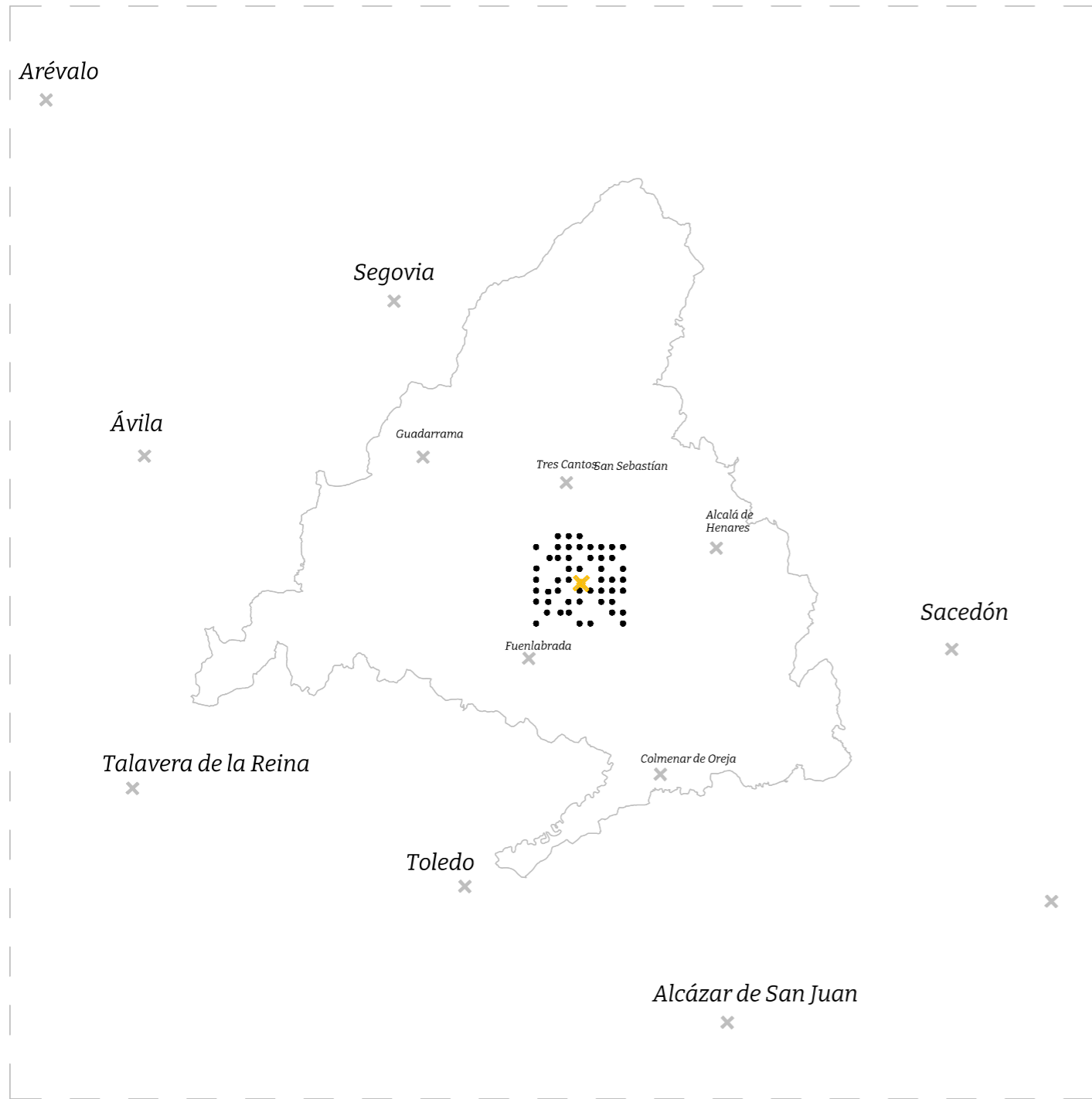


Fig 57.Estado inicial de la simulación 1



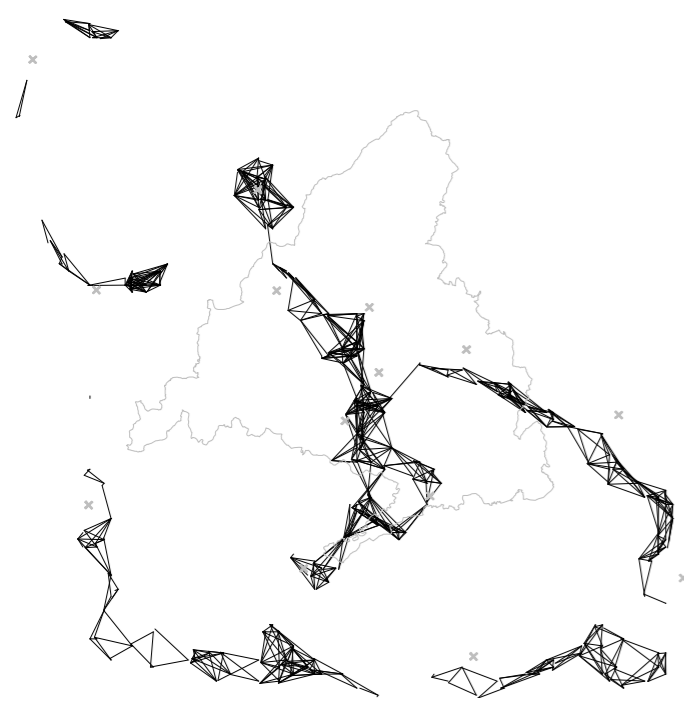
- ✕ Núcleos de población >3.5km² finales
- Agentes iniciales
- ✕ Punto de partida
- Delimitación CAM
- - Delimitación de la superficie



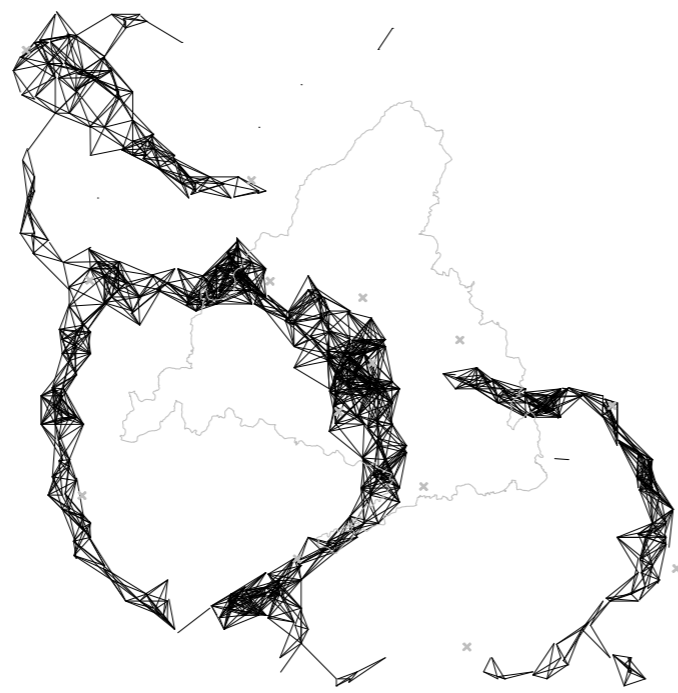
Fig 54. Estado inicial de la simulación final

Simulación final

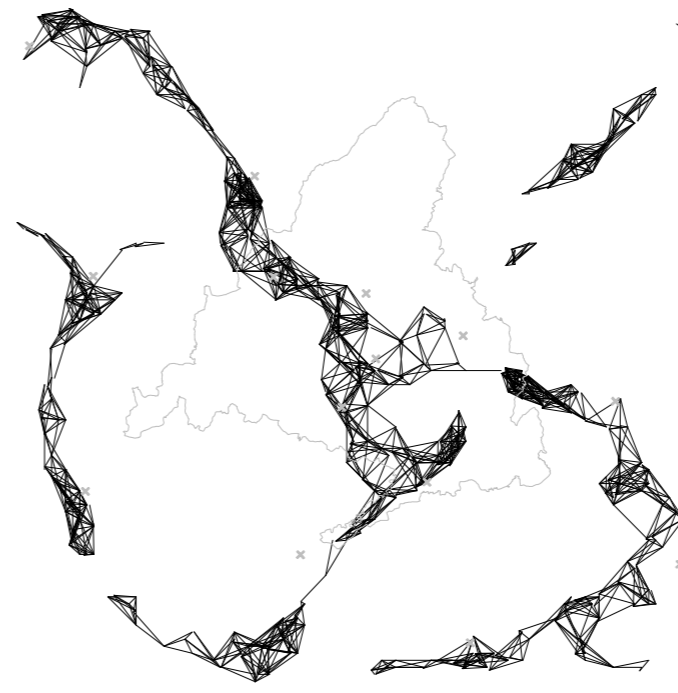




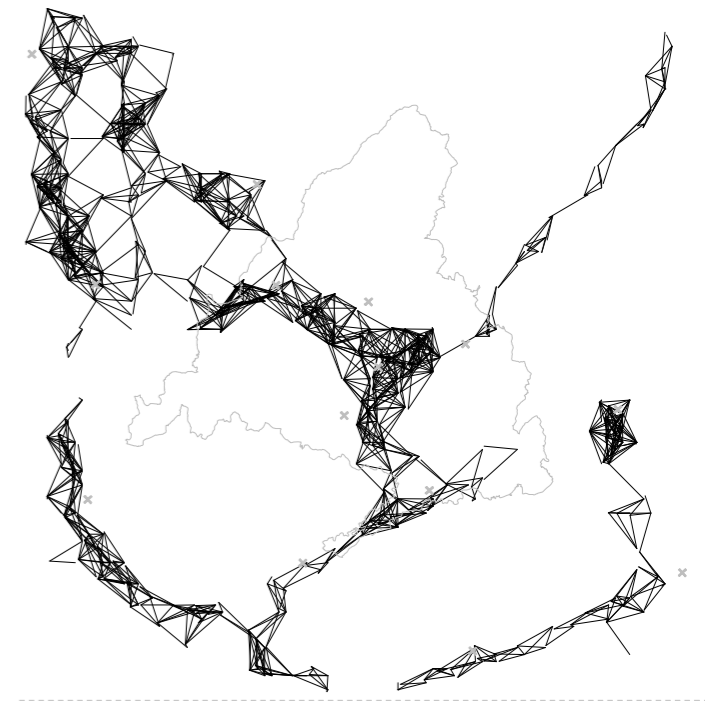
iteración 100



iteración 250

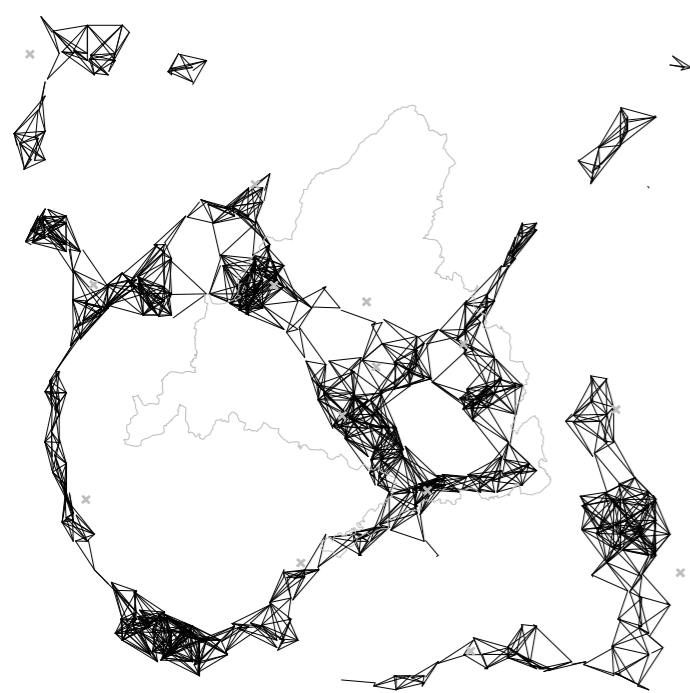


iteración 500

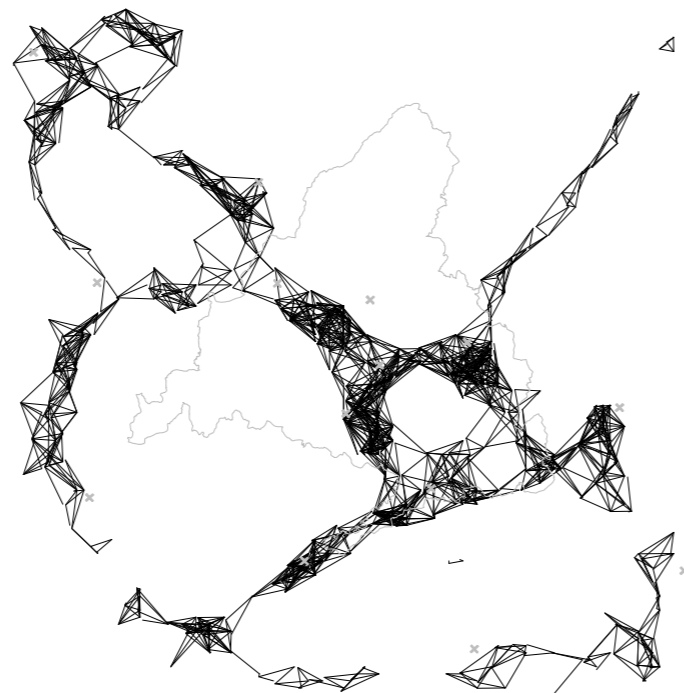


iteración 750

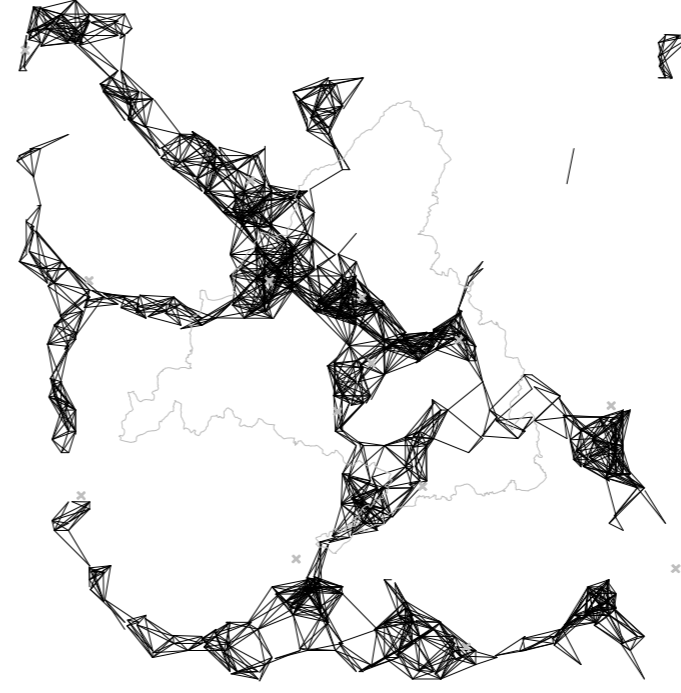
Fig 58. Proceso de crecimiento de simulación en Physarealm, simulación final



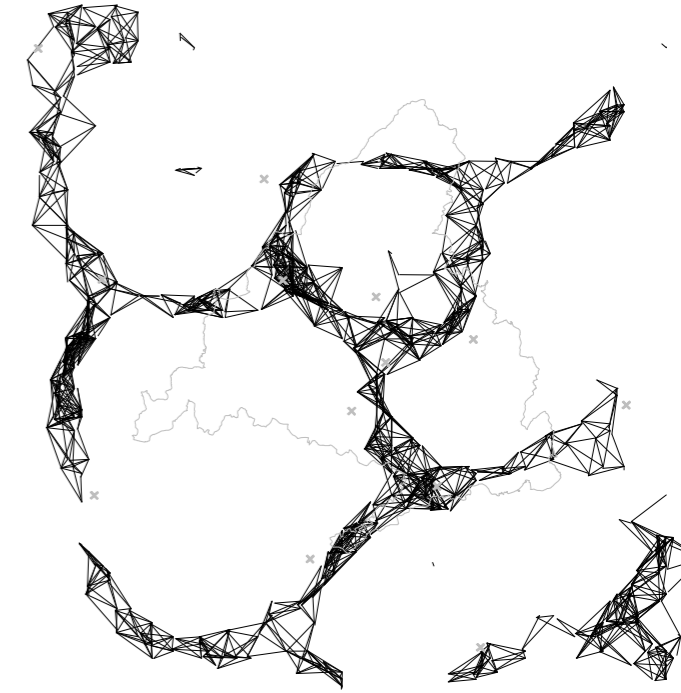
iteración 1000



iteración 1250



iteración 2000



iteración 5000

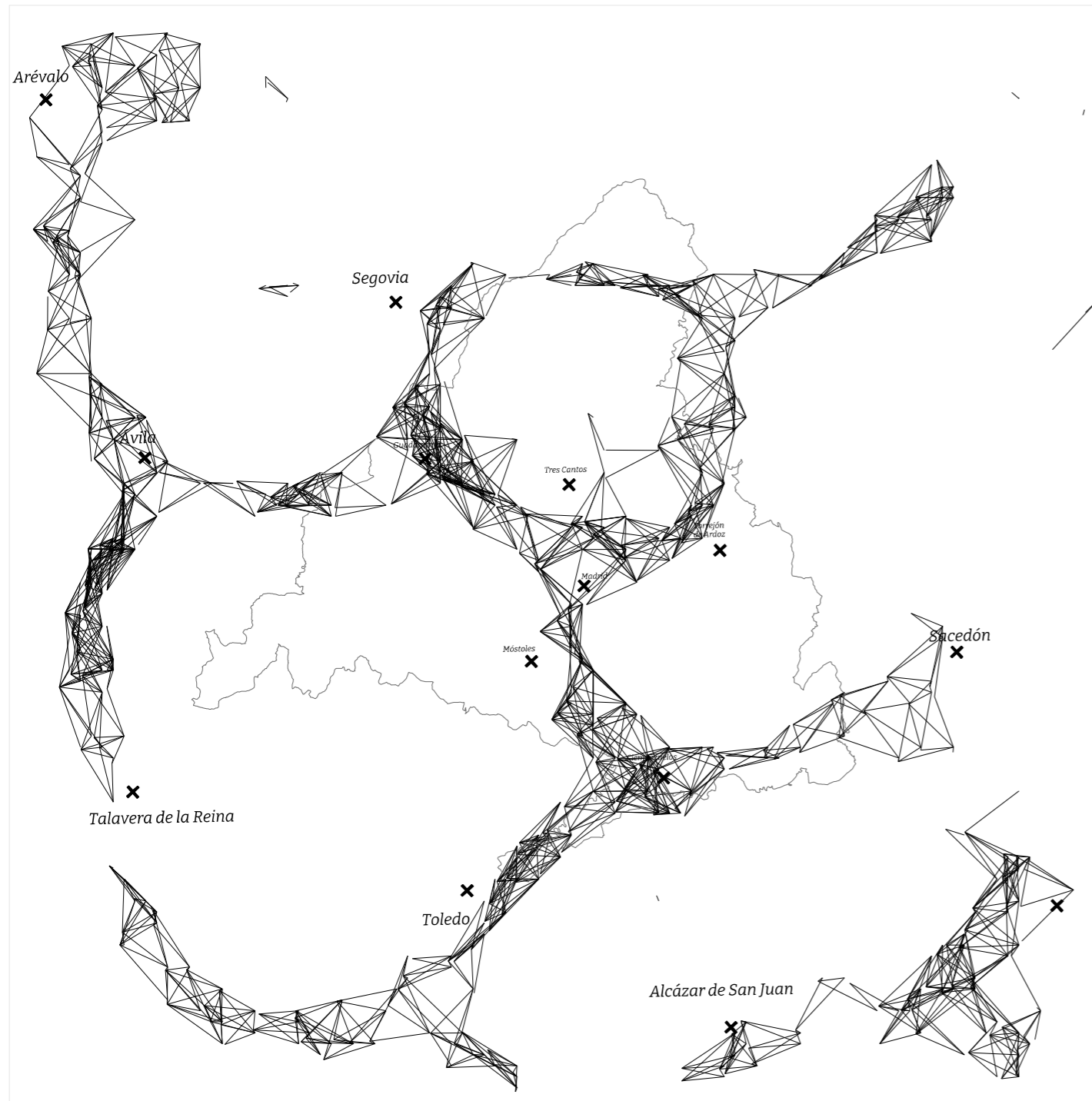


Fig 59. Proceso de crecimiento de simulación en Physarealm, simulación 2

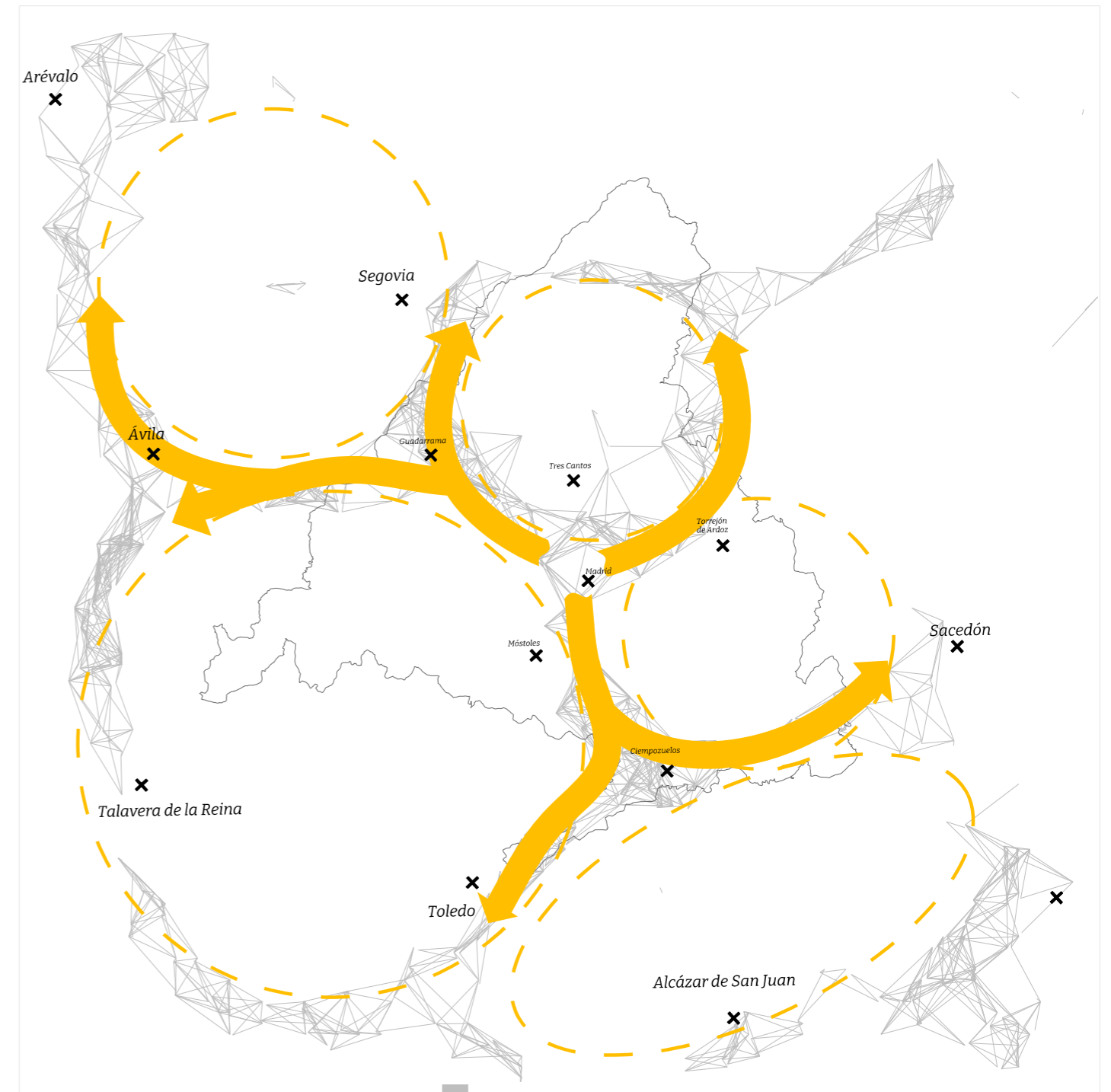


Fig 60. Proceso de crecimiento de simulación en Physarealm, simulación 2

Urbanismo 'de enjambre'

Steven Johnson afirma en su libro *Emergence, The Connector Lives of Ants, Cities and Software* que:

"Like any emergent system... The city is a pattern in time..."

"Como un sistema emergente, la ciudad es un patrón en el tiempo... La ciudad opera como una inteligencia de enjambre..."

A lo que posteriormente, el arquitecto Neil Leach se pregunta en su publicación *Swarm Urbanism*:

"If cities and software programs display a similar emergent logic, how might we make use of digital technologies to model a city?"

"Si la ciudad y los programas de software muestran una lógica emergente, ¿cómo podemos usar las tecnologías digitales para modelar la ciudad?"

Se buscan, por tanto, herramientas que sean capaces de modificar mallas a través de ciertos parámetros, para obtener resultados que se encuentren cerca de ser mallas urbanas.

En la misma publicación, Neil Leach nos cuenta que estas herramientas pueden ser analógicas como las que Frei Otto planteaba a través de elaborar una malla de hilos de lana que estuvieran atados a determinados puntos, formando caminos, y mojando esta malla, para que así los hilos se pegaran entre sí en ciertos lugares, una especie de eliminación del exceso de caminos, concentrándolos en uno único, economizando así la red.

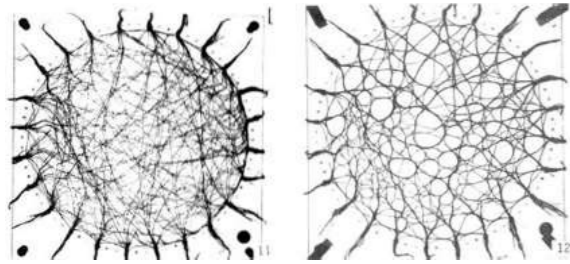


Fig 61. Modelo de malla mojada para optimizar el exceso de la red de Marek Kolodziejczyk, Institute for Lightweight Structures (ILEK), Stuttgart, 1991

Esta herramienta, sin embargo, estaba supeditada a una red geoméricamente fija, es decir, una red predefinida, y lo que se busca es precisamente un mecanismo en el que exista interacción entre los elementos entre ellos y con el medio, lo cual se acerca a una inteligencia artificial de enjambre, que puede ser desarrollada a través de algoritmos multiagente¹

Un buen ejemplo de estudio de este urbanismo de enjambre es el de el estudio de Roland Snooks y Robert Stuart-Smith, en Australia, quienes desarrollan una herramienta llamada Kokkugia, para el planteamiento de tejidos urbanos a través de un algoritmo multiagente en Melbourne.



Fig 62. Imagen de la aplicación del urbanismo de enjambre en Melbourne por Kokkugia

Estos afirman que:

"An application of swarm logic to urbanism enables a shift from notions of the master-plan to that of master-algorithm as an urban design tool. This shift changes the conception of urban design from a sequential set of decisions at reducing scales, to a simultaneous process in which a set of micro or local decisions interact to generate a complex urban system. Rather than designing an urban plan that meets a finite set of criteria, urban imperatives are programmed into a set of agents which are able to self-organise"

"La aplicación de la lógica del enjambre al urbanismo permite un cambio de las nociones del plan urbano a la del algoritmo urbano como herramienta de diseño urbano. Este cambio transfiere la concepción del diseño urbano como conjunto secuencial de decisiones a escalas reducidas, a un proceso simultáneo en el que un conjunto de decisiones pequeñas o locales interactúan para generar un sistema urbano complejo, en lugar de diseñar un plan urbano que cumpla determinados criterios, los que se programan en el conjunto de agentes que pueden autoorganizarse"

Por lo que podríamos decir que estas herramientas y esta visión del urbanismo inciden en la necesidad de plantear como un todo, en oposición a la práctica convencional que planea sectores, áreas, o pequeñas unidades que, en ocasiones, no tienen en cuenta el contexto global.

06. Conclusiones

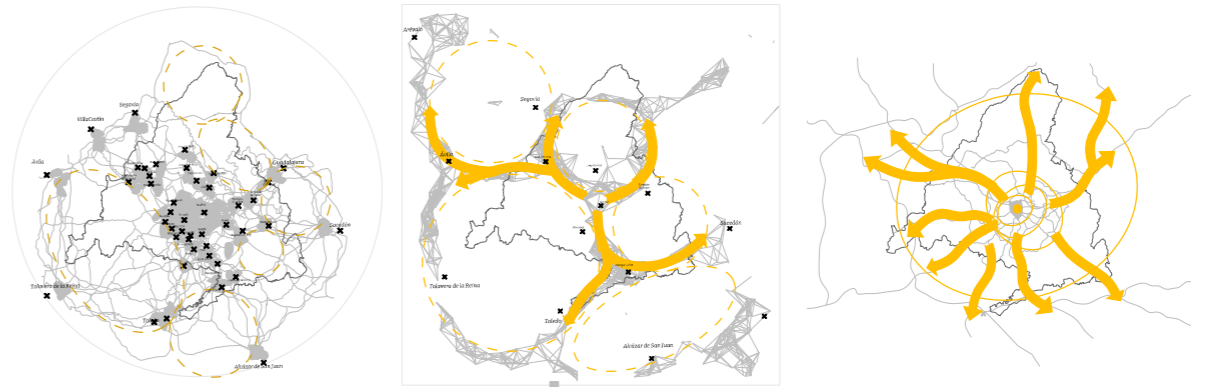


Fig 63. Diagramas de la red obtenida a través de los cultivos (1), de Physarealm(2) y de la red existente (3)

La lógica de optimización detrás del mecanismo de supervivencia que reside en Physarum es algo que ya se ha utilizado para tratar de minimizar redes, siendo ese el motivo de partida de la experimentación con él y la motivación del análisis gráfico en su crecimiento.

Es fundamental decir, que con este trabajo no se pretende establecer una aplicación y metodología directa de Physarum como organismo biológico, sino testear la metodología que ya se ha utilizado en experimentos anteriores y se encuentra al alcance con el fin de analizar los resultados gráficos. Se concluye entonces que:

1. La metodología aún no es adecuada para la definición de redes de transporte minimizadas por Physarum como resultado.

En el caso de los cultivos, aunque los que se evaluaron fueron los más cercanos a elaborar una red con todos los puntos propuestos, los experimentos fueron finalmente una muestra demasiado escasa para aproximar un patrón concreto. Incluso al haber obtenido más datos, se necesita un mecanismo más acertado de aproximación de los resultados a un resultado medio final, que no se han llegado a implementar en este trabajo.

En el caso de las simulaciones, sucede algo parecido, se necesitan mecanismos de aproximación de los resultados que no están al alcance y a disposición de profesionales del ámbito de la arquitectura, y el método utilizado no produce estos gráficos buscados.

2. Aunque no se ha aproximado una red concreta a partir de los resultados, sí se puede observar que la trama elaborada es diferente a la existente en Madrid

Existe cierto parecido entre los resultados obtenidos en las redes elaboradas por Physarum físico y virtual. Pero más allá de las coincidencias o diferencias entre estos, se identifica un tejido de lógica generadora muy diferente al tejido existente en Madrid, que constituye una red radial, lo que sugiere que las redes de transporte trazadas por nosotros se encuentran muy lejos de esta minimización marcada por Physarum, que si bien no podemos afirmar que su resultado sea una optimización completa de la red con los puntos propuestos, puede

ser una buena aproximación, ya que, como se ha evidenciado en múltiples ocasiones, Physarum minimiza redes de transporte en menor o mayor medida. Además el hecho de que las redes producidas por Physarum en los cultivos sean de longitudes menores que la red existente de carreteras principales de Madrid (datos en Fig. 46), podría sugerir precisamente este fenómeno de minimización, aunque esto es meramente indicativo debido las características de la metodología.

En el caso de las simulaciones, aunque la utilidad de la herramienta software no está verificada para el propósito de optimizar redes, su proveniencia de algoritmos inspirados en Physarum, sugiere esta capacidad.

3. Physarum es fuente de inspiración para herramientas potenciales del urbanismo de 'enjambre'.

A pesar de que sabemos que el hándicap de los programas de software es que poseen un límite de parámetros o estímulos a tener en cuenta a la hora de proponer un tejido urbano, como las variables más cualitativas de la existencia humana, ya sean desde el derecho a la vivienda, como el sistema político establecido, y que eso aleja enormemente los resultados de la realidad, sería extremista no reconocer el potencial de los mismos. Es posible que la habilidad humana para plantear tejidos urbanos sea también muy limitada a la hora de tener en cuenta estímulos, y de ello hablan nuestras ciudades existentes.

En el marco del *Urbanismo de Enjambre (Swarm Urbanism)* es donde se podrían encontrar los tejidos producidos por las simulaciones de Physarealm, ya que se lleva a cabo a través de inteligencias de enjambre en las que los elementos del enjambre son capaces de tomar sus propias decisiones, como en el algoritmo multiagente de Jones descrito en apartados anteriores de este trabajo.

4. Los resultados son dinámicos e indeterminados, a través de Physarealm.

Nótese que, a partir de los resultados obtenidos, es imposible aproximar una red definida a través de Physarealm, dada la complejidad de los resultados, y su constante movimiento. Los resultados fueron dinámicos y aunque no se modificaba el tejido obtenido en su totalidad, se observaban modifi-

1 LEACH, N. (2009) / *Swarm Urbanism*. / *Archit Design*, 79: 56-63.

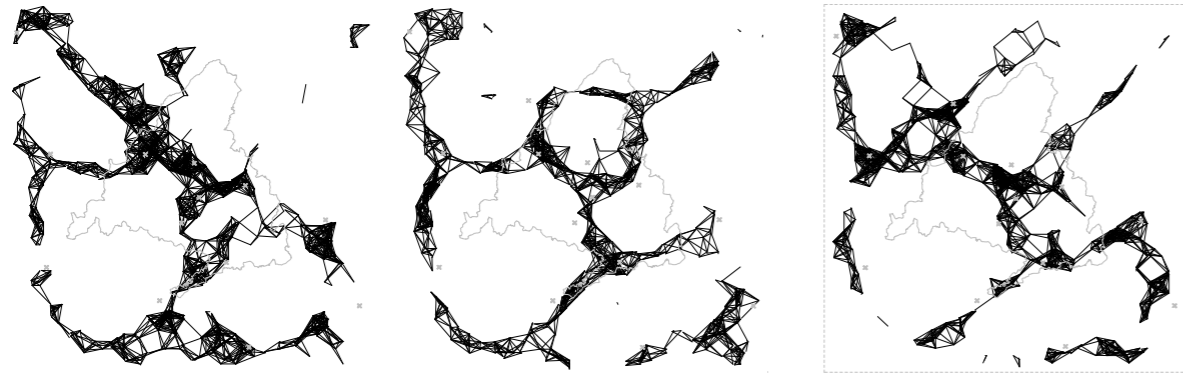


Fig 64. Iteraciones 2500, 5000 y 7500 de la simulación 2, donde se observa como se retorna a una estructura anterior

caciones parciales de la misma a lo largo del tiempo. (Fig.64)

Además, es cierto que se podrían obtener diferentes variantes del patrón encontrado, como ha sucedido en otros estudios de la misma naturaleza y metodología similar.²

Pero es posible que este suceso no sea una desventaja, por no permitir una definición exacta de redes de transporte, sino precisamente una oportunidad. La aplicación del algoritmo de Jones a través de Physarealm tiende a generar resultados semiestables, y esto podría permitir al sistema permanecer constantemente en respuesta al cambio de condiciones, como Neil Leach afirma de otras tramas generadas por inteligencias de enjambre³. Y, es posible que los algoritmos inspirados en Physarum puedan atender al diseño urbano como un todo, en vez de como una secuencia de acciones locales, como menciona Kokkugia⁴.

5. Physarealm es un software que está lejos de formar parte de la creación de redes de transporte, por el momento.

Debido a que algunos comandos sufren de errores en ciertos casos, como el caso de los obstáculos y su implementación en 2D, Physarealm se encuentra lejos de simular como tal el crecimiento de Physarum, y aún más de la elaboración de redes de transporte ya que demasiados estímulos no se tienen en cuenta, como podrían ser las preexistencias u otras necesidades

La implementación de estos parámetros y la definición de una metodología estandarizada conciernen a futuras investigaciones sobre minimización de redes de transporte por Physarum.

Artículos de prensa y conferencias:

- I. RIPLEY, B. Y KNIGHT, E. (2022). / **El "blob", la extraordinaria criatura que nos obliga a cuestionarnos si somos la especie más inteligente** / BBC News / Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-62663226>
- II. RFI, (2019) / **¿Qué es el 'blob', la criatura estrella del zoológico de París?** / rFI / [Disponible en: <https://www.rfi.fr/es/francia/20191028-que-es-el-blob-la-criatura-estrella-del-zoologico-de-paris>]
- III. HEATHER BARNETT / **What humans can learn from semi-intelligent mold** [en línea] / [videograbación] / TED talk, 2014 / [Consultado en: <https://www.youtube.com/watch?v=2UxGrde1NDA>]

Libros y artículos de revista científica:

- IV. ANDREW. ADAMATZKY / **Bioevaluation Of World Transport Networks** / [en línea] / Estados Unidos: World Scientific Publishing Company / 2012 / ISBN: 978-9814407038 / [Consultado en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upmes/detail.action?docID=1143295&pq-origsite=primo>]
- V. BONIFACI, V, MEHLHORN, K. ; VARMA, G. (2012) / **Physarum can compute shortest paths** / En: Journal of theoretical biology [en línea], Elsevier. n° 309 p. 121-133 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.06.017>]
- VI. NAKAGAKI, T., YAMADA, H. Y T'OTH, A. (2000) / **Maze-solving by an amoeboid organism.** / En: Nature, [en línea], n°407, p. 470 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1038/35035159>]
- VII. TERO, A., KOBAYASHI, R. Y NAKAGAKI, T. (2007) / **A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold.** / En: Journal of theoretical biology [en línea], Elsevier. n° 309 p. 121-133 En: Journal of theoretical biology [en línea], Elsevier. n° 244 p. 553-564 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2006.07.015>]
- VIII. MENÉNDEZ RAMOS, M. (2021) / **Análisis del ciclo vital del hongo plasmodial Physarum polycephalum** / [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Coruña] / Repositorio Universidad de La Coruña / [Disponible en: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/29268/MenendezRamos_Miguel_TFG_2021.pdf?sequence=2]
- IX. OETTMEIER, C, BRIX, K. Y DÖBEREINER, H. (2017) / **Physarum polycephalum—a new take on a classic model system** / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.50, N° 41/ [Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/aa8699>]
- X. SWANSTON, E (2000) / **A study of developmentally regulated genes in Physarum polycephalum** / [Tesis, Universidad de Leicester] / Repositorio de investigación de la universidad de Leicester / [Disponible en: https://leicester.figshare.com/articles/thesis/A_study_of_developmentally_regulated_genes_in_Physarum_polycephalum/10165514/1]
- XI. TAKAMATSU, A., GOMI, T., ENDO, T., HIRAI, T. Y SASAKI, T. (2017) / **Energy-saving with low dimensional network in Physarum plasmodium** / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.50, N° 15/ [Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa635a>]
- XII. OETTMEIER, C, NAKAGAKI, T., Y DÖBEREINER, H. (2020) / **Slime mold on the rise: the physics of Physarum polycephalum** / En: Journal of Physics D: Applied Physics [en línea], IOP Publishing online, V.53, N° 31/ [Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab866c>]
- XIII. BALDAUF, S. L. Y DOOLITTLE, W. F. (1997) / **Origin and evolution of the slime molds (Mycetozoa)** / En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) [en línea] V. 94, p. 12007–12012 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.22.12007>]
- XIV. TERO, A., TAKAGI, S., SAIGUSA, T., KENTARO, I., BEBBER, D. P., FRICKER, M. D., YUMIKI, K., KOBAYASHI, R. Y NAKAGAKI, T. (2010) / **Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design** / En: Science [en línea] V. 327, p. 439-442 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1177894>]
- XV. YAHUI SUN (2017) / **Physarum-inspired Network Optimization: A Review** / [Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.02910>]
- XVI. REID, C.R., LATTY, T., DUSSUTOUR, A. Y BEEKMAN, M. (2012) / **Slime mold uses an externalized spatial "memory to navigate in complex environments"** / En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) [en línea] V. 109, n°43 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215037109>]
- XVII. NAKAGAKI, T, IIMA, M., UEDA, T., NISHIURA, Y., SAIGUSA, T., TERO, A., KOBAYASHI, R Y SHOWALTER, K. (2007) / **Minimum-Risk Path Finding by an Adaptive Amoebal Network** / En: Physical Review Letters [en línea], V.99, N° 6, 068104/ [Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/aa8699>]
- XVIII. KAYNARKAYA, S., ÇAĞDAŞ, G. (2022) / **Evaluation of Metro Lines with Swarm Intelligence Approach** / En: Journal of Information Technology in Construction (ITcon), V.27, p 802-826/ [Disponible en: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.039>]
- XIX. FLEIG, P., KRAMAR, M., WILCZEK, M. Y ALIMA, K. (2022) / **Emergence of behavior in a self-organized living matter network** / En: eLife [en línea] / [Disponible en: <https://doi.org/10.7554/eLife.62863>]
- XX. KAYNARKAYA S, ÇAĞDAŞ G (2022) / **Evaluation of Metro Lines with Swarm Intelligence Approach** / ITcon V. 27, pg. 802-826 / [Disponible en: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.039>]
- XXI. JONES, JEFF. (2010) / **The Emergence and Dynamical Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level**

² AZAD, S. B. . (2022) / *Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla: A Perspective from Grasshopper.* / MIST International Journal of Science and Technology, 9(2), 23–29.

³ LEACH, N. (2009) / *Swarm Urbanism.* / Archt Design, 79: 56-63.

⁴ LEACH, N. (2009) / *Swarm Urbanism.* / Archt Design, 79: 56-63.

Behaviours. / IJUC. 6. 125-144. / [Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.06579>]

XXII. AZAD, S. B. . (2022)/ **Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla: A Perspective from Grasshopper**. / MIST International Journal of Science and Technology, 9(2), 23-29. / [Disponible en: [https://doi.org/10.47981/j.mijst.09\(02\)2021.313\(23-29\)](https://doi.org/10.47981/j.mijst.09(02)2021.313(23-29))]

XXIII. LEACH, N. (2009) / **Swarm Urbanism**. / Archit Design, 79: 56-63. / [Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ad.918>]

08. Fuentes de las ilustraciones

Fig1. Imagen de portada. Elaboración propia

p.4

Fig2. Imagen extraída de post online de La Libre. (<https://www.lalibre.be/planete/sciences-espace/2022/05/08/accueillez-chez-vous-le-genie-sans-cerveau-3G2434ZZ7ZHSJHGMI2CWHH2ZAU/>)

Fig15. Elaboración propia

Fig16. Elaboración propia

Fig17. Elaboración propia

Fig3. Boletín de noticias, The Conversation (<https://theconversation.com/hearts-cells-and-mud-how-biology-helps-humans-re-imagine-our-cities-in-vexed-times-173325>)

Fig18. Elaboración propia

Fig19. Elaboración propia

Fig20. Elaboración propia

Fig4. Boletín de noticias, The Conversation (<https://theconversation.com/hearts-cells-and-mud-how-biology-helps-humans-re-imagine-our-cities-in-vexed-times-173325>)

Fig21. Elaboración propia

Fig22. Elaboración propia

Fig23. Elaboración propia

Fig5. Revista Quanta Magazine (<https://www.quantamagazine.org/slime-molds-remember-but-do-they-learn-20180709/>)

Fig24. Elaboración propia

Fig25. Elaboración propia

Fig6. NAKAGAKI, T., YAMADA, H. Y T'OTH, A. (2000)/ **Maze-solving by an amoeboid organism**. / En: Nature, [en línea], n°407, p. 470 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1038/35035159>]Nakagaki, Toshiyuki; Iima, Makoto; Ueda, Tetsuo; Nishiura, Yasumasa; Saigusa, Tetsu; Tero, Atsushi; Kobayashi, Ryo; Showalter, Kenneth / **Minimum risk path finding** / En: Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers / 2007 / p. 068104-2

Fig26. Elaboración propia

Fig27. Elaboración propia

Fig28. Elaboración propia

Fig29. Elaboración propia

Fig30. Elaboración propia

Fig31. Elaboración propia

Fig32. Elaboración propia

Fig7. TERO, A., TAKAGI, S., SAIGUSA, T., KENTARO, I., BEBER, D. P., FRICKER, M. D., YUMIKI, K., KOBAYASHI, R. Y NAKAGAKI, T. (2010)/ **Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design** /En: Science [en línea] V. 327, p. 439-442 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1177894>]

Fig33. Elaboración propia

Fig34. Elaboración propia

Fig35. Elaboración propia

Fig36. Elaboración propia

Fig8. SWANSTON, E (2000) / **A study of developmentally regulated genes in Physarum polycephalum** / [Tesis, Universidad de Leicester]/ Repositorio de investigación de la universidad de Leicester / [Disponible en: https://leicester.figshare.com/articles/thesis/A_study_of_developmentally_regulated_genes_in_Physarum_polycephalum/10165514/1]

Fig37. Elaboración propia

Fig38. Elaboración propia

Fig39. Elaboración propia

Fig40. Elaboración propia

Fig9. BALDAUF, S. L. Y DOOLITTLE, W. F. (1997) / **Origin and evolution of the slime molds (Mycetozoa)** / En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) [en línea] V. 94, p. 12007-12012 / [Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.94.22.12007>]

Fig41. Elaboración propia

Fig42. Elaboración propia

Fig43. Elaboración propia

Fig44. Elaboración propia

Fig10. Repositorio de la Universidad Guelph (<https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/handle/10214/7190>)

Fig45. Elaboración propia

Fig46. Elaboración propia

Fig11. Elaboración propia

Fig47. Elaboración propia

Fig12. Elaboración propia

Fig48. Elaboración propia

Fig13. Elaboración propia

Fig49. JONES, JEFF. (2010) / **The Emergence and Dynamical Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level Behaviours**. / IJUC. 6. 125-144, p.5 / [Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.06579>]

Fig50. JONES, JEFF. (2010) / **The Emergence and Dynamical**

Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level Behaviours. / IJUC. 6. 125-144, p.7 / [Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.06579>]

Fig51. Elaboración propia

Fig52. KAYNARKAYA S, ÇAĞDAŞ G (2022)/ **Evaluation of Metro Lines with Swarm Intelligence Approach** / ITcon V. 27, pg. 802-826 / [Disponible en: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.039>]

Fig53. Elaboración propia

Fig54. Elaboración propia

Fig55. Elaboración propia

Fig56. Elaboración propia

Fig57. Elaboración propia

Fig58. Elaboración propia

Fig59. Elaboración propia

Fig60. Elaboración propia

Fig61. LEACH, NEIL. (2009) / **Digital Cities** / Architectural Design. 79. 6 - 13/ Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ad.911>

Fig62. Extraída de la página web de Kokkugia: <https://www.kokkugia.com/swarm-urbanism>

Fig63. Elaboración propia

Fig64. Elaboración propia

